ALEKSANDRO STULGINSKIO UNIVERSITETAS

LIETUVOS AGRARINIŲ IR MIŠKŲ MOKSLŲ CENTRAS

Eglė Norkevičienė

RYKŠTINĖS SOROS (*PANICUM VIRGATUM* L.) AGROBIOLOGINIS POTENCIALAS EUROPOS NEMORALINĖJE ZONOJE

DAKTARO DISERTACIJA

Žemės ūkio mokslai, agronomija (01 A)

Akademija, 2018

Disertacija rengta 2013–2017 metais Lietuvos agrarinių ir miškų mokslų centre pagal Lietuvos Respublikos švietimo ir mokslo ministro 2012 m. vasario 24 d. įsakymu Nr. V-327 suteiktą doktorantūros teisę Aleksandro Stulginskio universitetui su Lietuvos agrarinių ir miškų, mokslų centru

Mokslinė vadovė:
Dr. Bronislava BUTKUTĖ (Lietuvos agrarinių ir miškų mokslų centras, Žemės ūkio mokslai, Agronomija 01 A)

Mokslinė konsultantė:
Dr. Nijolė LEMEŽIENĖ (Lietuvos agrarinių ir miškų mokslų centras, Žemės ūkio mokslai, Agronomija 01 A)

Disertacija ginama Aleksandro Stulginskio universiteto ir Lietuvos agrarinių ir miškų mokslų centro Agronomijos mokslo krypties taryboje

Pirmininkas:
Dr. Aušra BRAZAITYTĖ (Lietuvos agrarinių ir miškų mokslų centras, Žemės ūkio mokslai, Agronomija 01 A)

Nariai:
Prof. habil. dr. Īzaks RAŠALS (Latvijos universitetas, Biomedicinos mokslai, Biologija 01 B)
Prof. dr. Aušra MARCINKEVIČIENĖ (Aleksandro Stulginskio universitetas, Žemės ūkio mokslai, Agronomija 01 A)
Dr. Regina SKUODIENĖ (Lietuvos agrarinių ir miškų mokslų centras, Žemės ūkio mokslai, Agronomija 01 A)
Dr. Juozas LABOKAS (Gamtos tyrimų centras, Biomedicinos mokslai, Botanika 04 B)

Disertacija bus ginama viešame Agronomijos mokslo krypties tarybos posėdyje 2018 m. 06 mėn. 08 d. 10 val. Aleksandro Stulginskio universiteto Centrinių rūmų 217 auditorijoje. Adresas: Aleksandro Stulginskio universitetas, Studentų g. 11, Akademija, LT-53361, Kauno r., Lietuva.

Disertaciją galima peržiūrėti Lietuvos agrarinių ir miškų mokslų centro ir Aleksandro Stulginskio universiteto bibliotekose.

TURINYS

SUMMARY OF DOCTORAL DISSERTATION **5**
SANTRUMPŲ SĄRAŠAS **32**
ĮVADAS **33**
1. LITERATŪROS ANALIZĖ **36**
1.1. Daugiamečių žolinių augalų biomasė bioenergijai 36
1.2. Daugiamečių energinių žolių tyrimai Lietuvoje 39
1.3. Rykštinės soros (*Panicum virgatum* L.) taksonominė ir biologinė charakteristika 41
1.4. Rykštinės soros agronominės savybės, auginimo technologijos ir ūkinė reikšmė ... 45
1.5. Rykštinės soros biomasės skirtos biokurui kokybės reikalavimai 49
2. TYRIMŲ OBJEKTAS, SĄLYGOS IR METODAI **53**
2.1. Tyrimų objektas 53
2.2. Tyrimų bendrosios sąlygos, laikas ir vieta 53
2.3. Tyrimų metodai ir duomenų statistinė analizė 57
2.3.1. Rykštinės soros biologinių savybių ir morfologinių požymių vertinimo metodai 57
2.3.2. Populiacijų ploidiškumo nustatymo metodai 58
2.3.3. Biomasės kokybės vertinimo metodai 58
2.3.4. Tyrimų duomenų statistinė analizė 59
2.4. Meteorologinės sąlygos 60
3. TYRIMŲ REZULTATAI IR APTARIMAS **64**
3.1. Rykštinės soros populiacijų įvairovės įvertinimas pagal biologines savybes ir morfologinius požymius 64
3.1.1. Žiemojimo ir fenologinių vystymosi tarpsnių įvertinimas 64
3.1.2. Biologinių savybių ir morfologinių požymių nustatymas 71
3.2. Rykštinės soros produktyvumas ir jo kaitos dėsningumai 80
3.2.1. Rykštinės soros antžeminės biomasės derlius genetinėse kolekcijose 80
3.2.2. Rykštinės soros skirtingo ploidiškumo populiacijų produktyvumas 87
3.2.3. Rykštinės soros produktyvumas pasėlyje 90
3.3. Rykštinės soros biomasės cheminės sudėties kaitos ypatumai 96
3.3.1. Anglies ir azoto koncentracijos rykštinės soros biomasėje 96

3.3.2. Lignino bei struktūrinių ir nestruktūrinių angliavandenių kaita rykštinės soros biomasėje 101
3.3.3. Rykštinės soros mineralinė biomasės sudėtis 107
3.3.4. Rykštinės soros populiacijų įvairovė pagal biomasės cheminę sudėtį ir agrobiologinius požymius 115
LITERATŪRA 120
DISERTACIJOS TEMA PASKELBTŲ PUBLIKACIJŲ SĄRAŠAS 138
PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA RANKRAŠČIAI 140
PRIEDAI 164

ALEKSANDRAS STULGINSKIS UNIVERSITY

LITHUANIAN RESEARCH CENTRE FOR AGRICULTURE
AND FORESTRY

Eglė Norkevičienė

AGROBIOLOGICAL POTENTIAL OF SWITCHGRASS (*PANICUM VIRGALTUM* L.) IN THE NEMORAL ZONE OF EUROPE

SUMMARY OF DOCTORAL DISSERTATION

Agricultural sciences, Agronomy (01 A)

AKADEMIJA, 2018

Dissertation was prepared during 2013–2017 in Lithuanian Research Centre for Agriculture and Forestry according to order No. V–327 by the Minister of Education and Science, released on 24th of February 2012, which granted the doctoral right to Aleksandras Stulginskis University together with Lithuanian Research Centre for Agriculture and Forestry.

Scientific supervisor

Dr. Bronislava BUTKUTĖ (Lithuanian Research Centre for Agriculture and Forestry, Agricultural Sciences, Agronomy 01 A)

Scientific consultant

Dr. Nijolė LEMEŽIENĖ (Lithuanian Research Centre for Agriculture and Forestry, Agricultural Sciences, Agronomy 01 A)

The defence of doctoral thesis will be held at the Council of Defence for Agricultural Sciences, Agronomy

Chairman:

Dr. Aušra BRAZAITYTĖ (Lithuanian Research Centre for Agriculture and Forestry, Agricultural Sciences, Agronomy 01 A)

Members:

Prof. habil. dr. Īzaks RAŠALS (Latvia University, Biomedical sciences, Biology 01 B)

Prof. dr. Aušra MARCINKEVIČIENĖ (Aleksandras Stulginskis University, Agricultural Sciences, Agronomy 01 A)

Dr. Regina SKUODIENĖ (Lithuanian Research Centre for Agriculture and Forestry, Agricultural Sciences, Agronomy 01 A)

Dr. Juozas LABOKAS (Nature Research Centre, Biomedical sciences, Botany 04 B)

The doctoral dissertation will be defended at the public session of the Council of Defence for Agricultural Sciences, Agronomy on the 8th of June, 2018 at 10 a.m., in auditorium 217 of Aleksandras Stulginskis University. Address: Studentų g. 11, Akademija, LT–53361, Kaunas distr., Lithuania.

The doctoral dissertation is available at the libraries of Aleksandras Stulginskis University and Lithuanian Research Centre for Agriculture and Forestry.

INTRODUCTION

The increase in global energy demand and the decrease in available fossil fuels as well as concern about the effects of greenhouse gasses on the global climate change pushes humanity towards the search for alternative energy sources (Robbins et al., 2012). Plant biomass is increasingly used not just for food, feed and fiber, but also for biofuel production in the EU countries (Nielsen et al., 2007). The environmental safety requirements steer the focus to non-edible plants (Hochman et al., 2008). The C_4 plants could provide an efficient solution for the development of innovative energy industry (Samson et al., 2005; Byrt et al., 2011). The C_4 refers to the 4- carbon molecule as the first product of this photosynthesis pathway. The C_4 plants are more productive and resistant to prolonged droughts and heat due to the reduction in photorespiration compared to the plants employing the C_3 pathway(Brutnell et al., 2010).

Only the minority of the C_4 plants can adapt easily to the cool climate of Europe. For the most part those are the weed species with high ecological plasticity and usually growing in secondary ecotopes (*Setaria viridis*, *Echinochloa crus-galli*, *Digitaria sanguinalis* etc.) (Motiekaitytė, 2002; Vainorienė, 2016). Multiple problems can be faced while trying to introduce economically important C_4 plants to the countries of Northern Europe. Quite often the tropical plant species e. g. *Pennisetum purpureum*, *Miscanthus* × *giganteus*, *Spartina pectinata*, suffer high damages or die out completely during the winter (Sage et al., 2015). Some of them (*M.* × *giganteus*) do not produce viable seeds.

Switchgrass (*Panicum virgatum*) is a perennial outcrossing C_4 plant species from the *Poaceae* family originating in North America (Casler, 2012) which has drawn the attention as the candidate for biofuel production in Europe (Alexopoulou et al., 2008; Smeets et al., 2009). In North America it is used for soil erosion prevention, feed production and grazing. During the recent decades switchgrass biomass was also used for solid biofuel, second generation bioethanol and biogas production (Lewandowski et al., 2003; Parrish, Fike, 2005).

Switchgrass has many advantages in comparison to C_3 plants: it is much better yielding, persistent and resistant to droughts. Furthermore, it has low fertilization requirements, there is no need for pesticide application and the harvesting expenses are low (Mani, 2004; McLaughlin, Kszos, 2005; Samson, 2007). Unlike *M.* × *giganteus* switchgrass can produce viable seed when grown in Europe (Iqbal et al., 2015) which is another very important advantage.

The data on switchgrass adaptation to the climatic conditions of Central and North Europe is scarce (Elbersen et al., 2001; Robbins et al., 2012). Only the ornamental switchgrass cultivars have been introduced in Lithuania so far. Therefore little is known about its ability to adapt to the local environmental conditions, productivity and crop management. No cultivar testing for the biomass chemical composition, yield potential and suitability of said yield for the biofuel production has been performed in Lithuania or neighbouring countries. Providing high yielding switchgrass cultivars or populations might be of paramount importance to the development of local energy sector.

Switchgrass can have multiple applications, and each of these applications, such as feed and different types of biofuel production, has its own quality requirements (Guretzky et al., 2011). The dynamics of mineral element and organic compound content in plant biomass depends on many factors (El-Nashaar et al., 2009; Lindsey et al., 2013), therefore extensive research is needed to identify the patterns in the biomass chemical composition fluctuations (Butkutė et al., 2013a; Butkutė et al., 2013b). Very little to no

switchgrass biomass quality research has been done in the Nemoral zone (Lithuania, Latvia, Estonia, Belorussia, Sweden, Norway and Finland).

Perennial grass species have a high energy potential, therefore plant biomass could at least partially replace fossil biofuels (Jakienė et al., 2013). High yet very realistic hopes are placed on the progress of technologies used for biomass-energy conversion which could reduce the cost of lignocellulose processing and consequently increase the demand for high yielding energetic plants.

Hypothesis. Switchgrass (*Panicum virgatum* L.) can be a new addition to the selection of crops to be used as the source of renewable energy in the Nemoral zone of Europe. The geographic origin, ploidy level and cutting management of switchgrass populations can be important factors governing its biomass yield and quality.

Aim of the study. To evaluate switchgrass phenotypic traits and economically important agro-biological characteristics, to establish the optimal cutting management and to identify the most valuable germplasm material for the cultivation in the European Nemoral zone.

Objectives of the study:

1. To evaluate the morphological traits and economically important characteristics of switchgrass populations;
2. To establish the effect of harvesting time and number on switchgrass biomass productivity;
3. To establish the effect of harvesting time and number on total switchgrass biomass chemical composition and the chemical composition of plant morphological organs;
4. To select the most valuable switchgrass genotypes based on the complex of desirable phenotypic traits and economically important agrobiological characteristics

Defended statements:

1. Switchgrass species can be successfully introduced to the European Nemoral zone;
2. Geographic origin of switchgrass population, ploidy level and cutting management have a significant effect on biomass yield;
3. Chemical composition of switchgrass biomass depends on cutting management and geographic origin of the genotype;
4. The most valuable switchgrass genotypes can be used as an economically efficient energy crop in the European Nemoral zone.

Scientific novelty. The switchgrass acclimatization to the conditions of European Nemoral zone has been evaluated for the first time. The upland ecotypes demonstrated sufficient winter-hardiness, reached the heading stage earlier than lowland ecotypes and were able to produce viable seeds during the vegetation season. The lowland ecotypes were highly susceptible to local winter conditions. Octoploid and mixed-ploidy populations produced higher biomass yield compared to tetraploid switchgrass populations.

Switchgrass plants produce the highest biomass yield when harvesting is performed once, at the seed ripening stage; two cuts per season lead to yield reduction in the subsequent years of harvesting. The evaluation of productivity and biomass quality trait dy-

namics demonstrated that switchgrass is more suitable for solid biofuel and second generation bioethanol than biogas production. This type of extensive switchgrass biomass yield and quality research under the climatic conditions of European Nemoral zone has not been previously reported.

Practical importance. Superior switchgrass genotypes were selected based on the complex of phenotypic traits and economically important agrobiological characteristics. These genotypes can be used on a large scale for biomass production for energy production purposes. The switchgrass genotypic and phenotypic diversity results acquired during this research will enable efficient breeding efforts of this species. The crop management can be optimized based on the switchgrass phenological development – yield relationship data, and the established regularities in plant biomass mineral and organic compound content variation enable rational choice of harvesting time in order to obtain high quality biomass for bioenergy production.

Approval of the dissertation work. The research data was published in 3 articles in the journals indexed in *Clarivate Analytics Web of Science* database with the citation index; 2 publications in the peer-reviewed periodical of scientific journals and 6 publications in conference proceedings and abstract books. The research results were presented in 11 national and international conferences. Part of the research data is presented in the chapter of the published Springer book "Renewable Energy in the Service of Mankind".

Volume and structure of the dissertation. The dissertation has been written in Lithuanian. It consists of 168 pages. It is composed of a summary, introduction, literature review, materials and methods, results and discussion, conclusions, references, a list of publications, copies of published articles and appendixes. The dissertation includes 12 tables, 40 figures. A total of 286 literature references have been used

EXPERIMENTAL MATERIAL AND METHODS

General conditions

Research object. The research germplasm consisted of wild ecotypes (54 accessions), breeding lines (3 accessions) and cultivars (19 accessions) of switchgrass (*Panicum virgatum* L.) obtained from the Plant Genetic Resources Conservation Unit of the United States Department of Agriculture and Agricultural Research Service.

Study site. The collection trials were carried out during 2013–2017 in the Central Lowland of Lithuania (55° 23′ 49″ N; 23° 51′ 40″ E), at the Institute of Agriculture, Lithuanian Research Centre for Agriculture and Forestry. The soil of the experimental site is *Endocalcari-Epihypogleyic Cambisol (CMg-p-w-can)* with a texture of moderately heavy loam. The chemical properties of the soil in the initial stage of the experiment and at the end of the investigations are presented in Table 1.

In the autumn, the fields were plowed, in spring, pre-sowing the fields were harrowed, cultivated and leveled. Pre-planting fertilization comprised of 15 kg ha^{-1} N, 45 kg ha^{-1} P_2O_5, 70 kg ha^{-1} K_2O. Additional fertilization after harvest and each spring of the following years were spread.

Table 1. The soil chemical properties at the experimental sites

Values	C_{org}	$N\text{-}NO_3$	$N\text{-}NH_4$	K_2O	P_2O_5	Ca	Mg	Na	S	pH_{KCl}
	g kg^{-1}	mg kg^{-1}								
Before the investigations										
Collection I	12.3	13.8	2.3	215	348	6064	932	41	2.6	6.2
Collection II	21.3	7.6	1.8	158	196	3294	590	38	2.5	7.1
After the investigations										
Collection I	17.9	4.22	1.76	142	154	5554	1050	-	2.6	7.3
Collection II	23.1	4.29	1.59	162	154	2884	442	-	1.7	6.9

Research into switchgrass agrobiological traits and biomass harvest was done in the fields of Institute of Agriculture's (LAMMC) Grass Breeding Department from 2013 to 2016. Chemical analyses of switchgrass biomass were carried out at the Institute of Agriculture's Chemical Research Laboratory from 2013 to 2016. The identification of ploidy level of plants was performed at the Institute of Agriculture's Laboratory of Genetics and Physiology in 2013–2014. The agrochemical values of soil were investigated at the Institute of Agriculture's Chemical Research Laboratory and Agrochemical Research Laboratory in 2014 and 2016 years.

Establishment of experiments

Two germplasm collections of switchgrass and one field experiment were established in 2012 and 2014.

The first germplasm collection of switchgrass (collection I) was set up in 2012. It consisted of 36 wild populations of switchgrass. The evaluation of the agrobiological characteristics and biomass yield were recorded in 2013, 2014, 2015 and 2016 years. Simulating the species management under commercial cultivation conditions, the grass was harvested in two cutting regimes. In the first regime, the grass was cut once at seed maturity stage for use as feedstock for second generation bioethanol and as solid biofuel. In the second regime, the grass was cut twice per season: at beginning of anthesis and after regrowth of the aftermath as a feedstock for biogas.

The second germplasm collection of switchgrass (collection II) was set up in 2014. It consisted of 68 wild populations, cultivars and breeding lines of switchgrass. The evaluation of the agrobiological characteristics and biomass yield were made in 2015 and 2016. The plants were harvested only once per season at seed maturity stage. The higher yielding accessions during both study years were identified.

Field experiment was set up in 2014 and consisted of three cultivars ('Dacotah', 'Cave in Rock', 'Forestburg') and one hybrid population of switchgrass. Hybrid population was created from the cross of wild population originated from North Dacota. Simulating the species management under commercial cultivation conditions, the plants in the experimental plots were harvested in two cutting regimes.

In the first regime, the plants were cut once for biomass use as feedstock for second generation bioethanol and as solid biofuel:

1) at seed maturity stage: 279 day of the year (DOY) in 2015 and DOY 277 in 2016;
2) before winter: DOY 337 in 2015 and DOY 333 in 2016;
3) after winter in spring: DOY 90 in 2016 and DOY 91 in 2017.

In the second regime, the grass was cut twice per season for biomass use as a feedstock for biogas:

1) the first cut was done at the beginning of anthesis: DOY 194 in 2015 and 2016; the second cut was done after re-growth of aftermath: DOY 279 in 2015 and DOY 277 in 2016;
2) the first cut was done at the beginning of flowering: DOY 216 in 2015 and DOY 221 in 2016; the second cut was done after re-growth of aftermath: DOY 279 in 2015 and DOY 277 in 2016.

In the field experiment seed yields (kg ha^{-1}) of different populations were evaluated as well.

The collections were set up using two-month old seedlings grown in a greenhouse. The seedlings were planted at a distance of 50 cm, in 50-cm apart rows, with seven (collecion I) or ten (collecion II) plants per row and two rows per replication. The field trial was laid out in randomized complete block design with two-fold replication, thus, having a total of 28 (collecion I) or 40 (collecion II) plants per field trial.

Field experiment was sown on 10 of June using seeder „Hege 76“. The field trial was laid out in randomized complete block design with three-fold replication. The experimental treatment plot size was 11.25 m^2. The sown seed rate was 12 kg ha^{-1}.

The investigations in the collection I lasted for 5 years, in the collection II and field experiment – for 3 years.

Research methods

The evaluation of agro-biological characteristics and morphological traits of switchgrass

Morphological traits and agronomically valuable characteristics of switchgrass populations were estimated in absolute values and points (according to the standards of visual assessment methods presented by the International Plant Genetic Resources Institute and adapted in the European Cooperative Programme for Plant Genetic Resources) (Tyler et al., 1985). For visual assessment of plant traits the guidelines of the International Union for the Protection of New Varieties of Plants (UPOV) were used as well (Millet, 2007).

The populations of switchgrass were tested for 23 traits: overwintering (%), bunch habit (score), bunch diameter (cm), number of stems per bunch (no.), attitude of leaf blade (score), leaf color (score), plant height (cm), length of flag leaf (cm), width of flag leaf (cm), length of first internode (cm), diameter of stem (mm), number of internodes (no.), length of panicle (cm), regrowth after cut (cm), inflorescence emergence earliness (day of year), principal growth stages (recorded as the start dates of phases, expressed in Gregorian calendar days), growing degree days (baseline ≥ 10 °C) (calculated from the beginning of the calendar year till the beginning of principal growth stages), weight of thousand seeds (g), seed yield per plant (g), seed yield per plot (kg ha^{-1}), fresh biomass yield (g $plant^{-1}$ and g ha^{-1}), dry matter yield (g $plant^{-1}$ and g ha^{-1}), analysis of dry matter yield structure (%): number of vegetative and generative stems, weight (g) of stems, leaves and panicles.

The start of the vegetation period of switchgrass was defined as the date (day number) of the fourth day of the first consecutive four-day period having daily mean temperature above the threshold (+10 °C).

Average dry matter yield for all cuts was determined by weighing all plants per plot and then the biomass yield was calculated per plant or per plot basis. Dry matter yield was determined by drying 500 g herbage samples at 105 °C to constant moisture.

Ploidy analysis

Plant ploidy level was estimated using a flowcytometer (Partec GmbH, Germany). The analysis was performed in plant leaf tissue. Based on the manufacturer's instructions, the following regime was selected: Gain=700, L-L=20, Speed=1. The data from the flow cytometric analysis were used to estimate plant genome size, i.e. nuclear DNA (deoxyribonucleic acid) content expressed in picograms (pg). The Standard used for the comparison was wheat (*Triticum* spp.) with a known nuclear DNA content (2n = 32 pg), which in our study corresponded to the cytometer's peak position at reading 236. The formula used for converting fluorescence values to DNA content was: nuclear DNA content = (mean position of unknown peak)/(mean position of known peak) × DNA content of known standard (Narasimhamoorthy et al., 2008).

Sample Preparation and Chemical Analyses

Fresh plant samples, chopped into pieces of 3–5 cm length, were initially dried at 105 °C for 15 min and then dried at 65 ± 5 °C for 24 hrs and ground in a cyclonic mill with a 1 mm sieve. Acid detergent fibre (ADF), and neutral detergent fibre (NDF) and acid detergent lignin (ADL) were determined using a cell wall detergent fractionation method according to Van Soest guidelines. NDF and ADF analyses were done on an ANKOM220 Fibre Analyzer (ANKOM Technology, USA) using F57 filter bags (25 µm porosity). ADL was determined in beakers on the remaining material from the ADF procedure as a residue insoluble in sulphuric acid (72% w/w). For Klason lignin determination, samples were digested with 72% sulphuric acid, then with dilute to 3% sulphuric acid, the insoluble residue is dried and weighed as lignin (Theander, Westerlund, 1986). Contents of cell wall structural carbohydrates cellulose (Cel) and hemicellulose (HCel) were calculated as the following differences: Cel = ADF − ADL and HCel = NDF − ADF, HoCel was calculated as the sum of structural carbohydrates Cel and HCel. Concentrations of water-soluble carbohydrates (WSC) in water extracts of dried samples were measured spectrophotometrically using the anthrone reagent (Zhao et al. 2010). Starch, a water-insoluble component of nonstructural carbohydrates (NSC) was determined in plant biomass residue after WSC washing with ethanol and water and hydrolysis with enzymes α-amylase and amyloglucosidase; released glucose was assayed following procedures described by D. Zhao et al. (2010). Total NSC content was calculated as the sum of WSC and starch. Total carbon (C), nitrogen (N) and sulphur (S) in the samples were assessed by dry combustion on a CNS analyser (Elementar, Vario EL, Germany). The ash content was determined as the mass left after sample incineration at 550(±10) ºC consistently with EN 14775:2009. Silicon (Si) content was determined spectrophotometrically on a Cary 50 UV-Vis (Varian Inc., USA; 660 nm) according to the method of W. M. Dai et al. (2005) and J. E. Kraska, G. A. Breitenbeck (2010). Potassium (K), calcium (Ca), sodium (Na) and magnesium (Mg) were quantified after digestion with the sulphuric acid by atomic absorption spectrophotometry (AAS). Parameters of the AAnalyst 200 instrument (Perkin Elmer, USA) were chosen in accordance with the manufacturer's instructions. Chloride (Cl) was determined in the extracts obtained by 0.085 mol L^{-1} $Ca(NO_3)_2$ water solution spectrophotometrically after Cl substitutes the thiocyanate ions in mercury

thiocyanate and the released thiocyanate forms a red iron-thiocyanate complex (Liu, 1998; Gaines et al., 1984). Absorption was measured at the wavelength 460 nm. HHV of the samples was measured in a bomb calorimeter according to LST CEN / TS 14918 standard method. All results were expressed on dry matter basis.

Statistical analysis

Before analysis, all data were tested for normality (Shapiro–Wilk test, $P \geq 0.05$). A descriptive statistics was used for data analysis. Mean±SE (standard error of mean) were used to describe the variability of measurements. The means were compared by t-test and F-test. Differences were considered to be significant at the 95 % level. The correlation (Pearson's correlation) and regression analysis between the data sets was done. Analysis of variance was performed to estimate the differences in the tested parameters among the treatments (year and genotype). Fisher's Protected LSD was used to compare means at $P = 0.05$ and $P = 0.01$. Multidimensional variation among the agromorphological traits and chemical composition of the biomass of switchgrass populations was summarized using principal component analysis (PCA). All principal components were derived using correlation matrices based on population-means. The plot and the curve of eigenvalues, expected under a random model, indicated the number of significant components. Analyses of variances were conducted using the statistical packages SAS Enterprise Guide 7.1 software (SAS Institute Inc), Statistica 7 software (StatSoft, Inc.) and MS Excel Analysis ToolPak.

Meteorological conditions

According to the environmental stratification of Europe, Lithuania is assigned to the Nemoral zone with the cool temperate climate and quite a short growing season of 190 – 195 days (Metzger et al., 2012). The annual mean precipitation in the experimental site is 550–600 mm and mean annual temperature is 6.0–6.5 °C. The average temperature in January, the coldest month in Lithuania, is -2.9 °C, and in the warmest month July 19.7 °C. However during the experimental period the weather conditions markedly differed between seasons.

The first season of **2013** was characterized by a cold and long-lasting winter, very late, dry and warm spring and changeable summer with heat waves. Autumn – winter period of 2013 can be defined as unusually warm with temperatures prevailing positive: the average monthly temperature in January and February was more than 5 °C higher than long-term average.

The winter of **2014** was late, short, with a thin (up to 5 cm) snow cover, and moderately deep (55 – 58 cm) layer of frozen soil. The spring was very early, windy, and changeable in terms of temperature and precipitation distribution (cold days alternated with hot ones). The summer was changeable in terms of temperature and precipitation distribution: chilly June, hot July, rainy and hot (first 10 days) August. The autumn was warm, dry, windy, and long.

The winter of **2015** was short, without a permanent snow cover, but with a shallow (approximately 20 cm depth) layer of frozen soil which lasted for 94 days. The weather was uncharacteristically warm and wet. There were many foggy and windy days that winter. The spring was very early, long, windy, and contrasting in terms of temperature (warm days alternated with cold ones). The summer was changeable: August was the

hottest, driest, and very sunny, while June and July were cool and rainy. Moisture content for the perennial grasses was critical almost all summer.

The season of **2016** was characterized by warm winter and warm, windy and wet spring. Summer season was unusually rainy and changeable in terms of temperature. The autumn was warm and dry.

RESULTS AND DISCUSSION

Agro-morfological traits analyses

Analysis of switchgrass over-wintering and phenological growth stages confirmed the hypothesis that the origin of the genotype is an important factor in plant adaptation and introduction success. Based on observations of this study, it appears that winter injury in switchgrass is most likely to occur during the establishment year when plants are less mature and have smaller root systems. In this study, during the first growing season most of the wild populations from North Dakota exhibited 100% over-winter survival rate or very low winter damage. Wild populations and cultivars, originating in the southern states of USA, were severely damaged after the first winter or did not survive at all.

The average date of switchgrass heading was the middle of July (DOY 200 – 201). The analysis of regression indicated that the earliness of heading of switchgrass populations negatively correlated with the latitude of their geographic origin (Fig. 1).

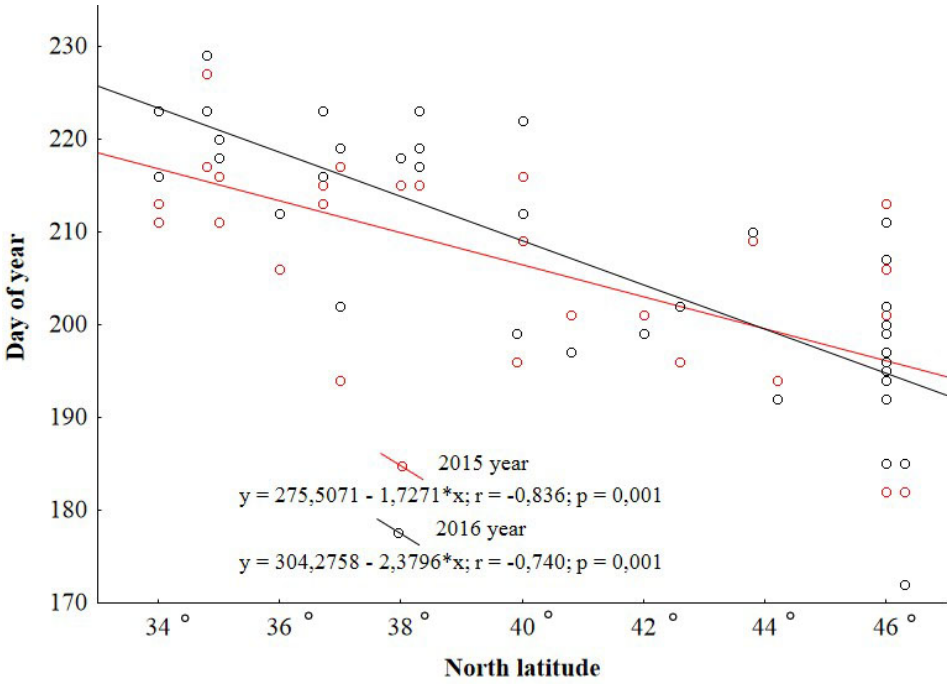


Figure 1. The relationship between the beginning of heading (day of year) and the geographic origin of switchgrass populations in 2015 and 2016 year. The beginning of heading stage is expressed in calendar days since the 1 of January

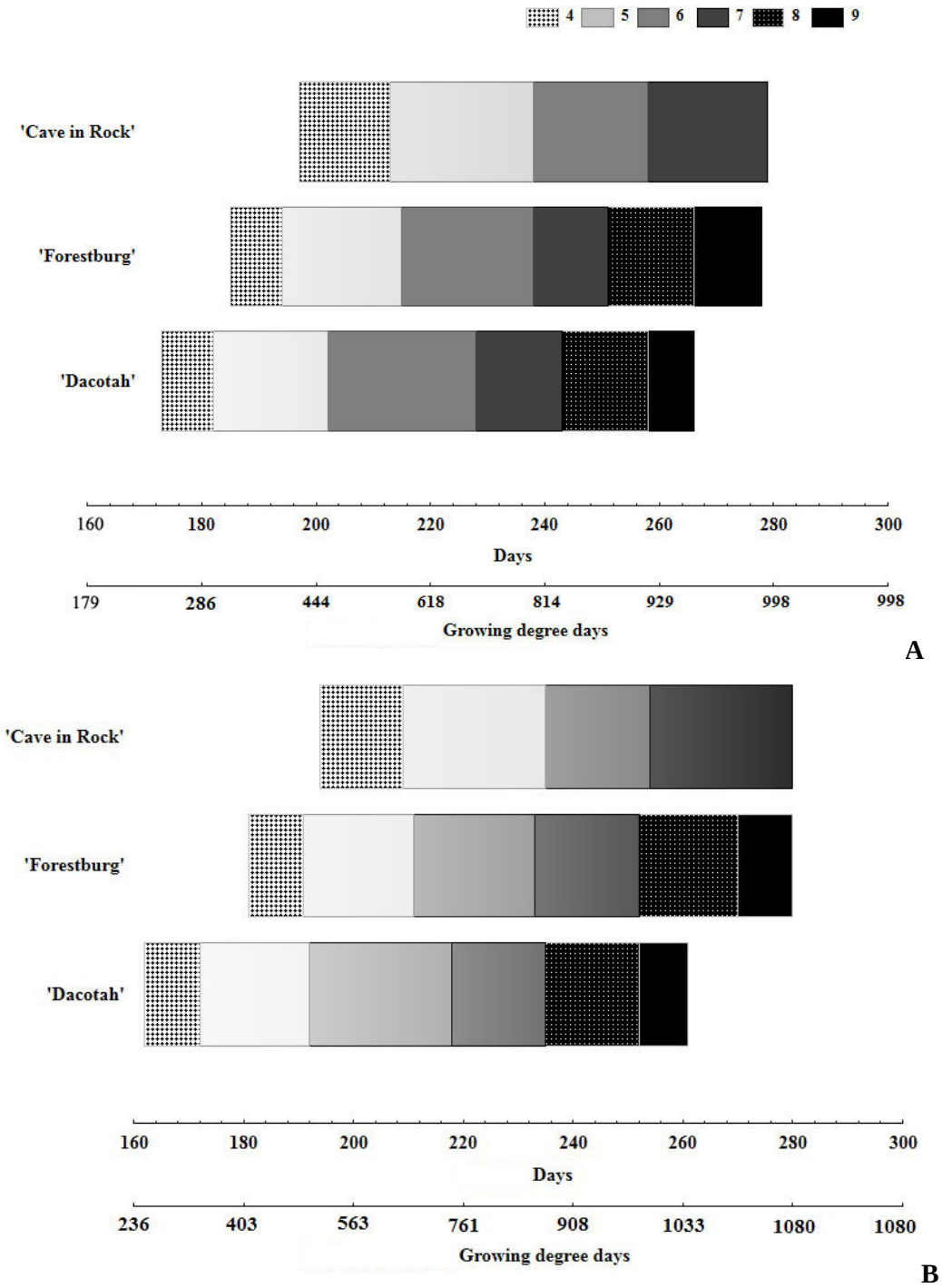


Figure 2. Phenological stages of switchgrass cultivars 'Dacotah', 'Forestburg' and 'Cave in Rock' in 2015 (A) and 2016 (B) years. Principal growth stages: 4 – booting, 5 – inflorescence emergence, heading, 6 – flowering, anthesis, 7 – development of fruit, 8 – ripening, 9 – senescence

Cultivar 'Dacotah' (place of origin North Dakota, USA) reached all phenological growth stages earlier than other cultivars, it‘s vegetation lasted for 135 – 145 days in total. Whereas cultivar 'Cave in Rock', originating in southern USA, was the latest one and did not go through ripening stage during the vegetation season (Figure 2).

The optimum temperature requirements for vegetative and reproductive development differed among the cultivars. The stage of fruit development of cultivar 'Cave in Rock' started at 924 – 996 growing degree days (GDD) whereas the values of GDD for the cultivar 'Dacotah' were 724 – 745. The duration of growth stages in calendar days was also different. Heading and flowering lasted longer than other growth stages. Switchgrass reproductive development from heading to full seed ripening lasted for 80 days on average.

The number of vegetative and generative tillers per bunch, 1000 seed weight, seed yield per plant and seed yield per plot were the most variable switchgrass traits, whereas plant height and bunch diameter were the most stable traits (Table 2).

Table 2. Summary of the basic morphological and economically useful properties characteristics of switchgrass wild populations and cultivars in 2015–2016

Traits	***Units***	***Mean***	***Mode***	***SD***	***Min.***	***Max.***	***CV %***
Bunch habit	*Points*	-	3	-	1	5	-
Bunch diameter	cm	22.08	23.84	1.72	18.90	24.85	7.82
Plant height	cm	171.41	173.03	14.02	128.50	198.33	8.18
Regrowth after cut	cm	93.76	94.39	9.31	71.75	110.92	9.93
Number of stems per bunch	*Number*	88.62	87.31	17.12	57.41	146.37	19.31
Number of vegetative tillers	*Number*	14.82	22.12	7.03	5.25	36.00	47.41
Number of productive tillers	*Number*	74.19	72.87	14.92	43.54	129.00	20.11
Leafiness	%	40.14	39.56	5.05	32.07	52.84	12.59
Attitude of leaf blade	*Points*	-	3	-	1	5	-
Length of flag leaf	cm	40.81	40.83	5.39	20.63	53.50	13.21
Width of flag leaf	cm	0.98	0.96	0.12	0.73	1.37	10.55
Length of panicle	cm	32.13	31.06	4.51	21.66	44.34	14.04
Weight of thousand seeds	g	1.28	1.15	0.35	0.81	2.29	27.28
Seed yield per plant	g	22.88	20.73	10.72	8.25	78.00	46.87
Seed yield per plot	kg ha^{-1}	106.00	106.73	59.83	40.11	170.42	56.44

The highest statistically significant correlations were estimated between total tiller number and generative tiller number per bunch, vegetative stem number and leaf width, leaf weight and panicle weight per plant. Switchgrass plant height till the start of generative development highly depends on GDD. The impact of weather conditions in different years on generative tiller number was greater than genotypic effect, in contrast to generative tiller weight which was more dependent on genotype than the environment. The correlation analysis confirmed that diameter, weight and number of internodes were positively correlated with generative tiller height. The weight and diameter of generative tillers

could be used in switchgrass genotype screening and biomass yield modelling as indirect productivity indicator.

Most of tetraploid switchgrass populations and cultivars were grouped separately from octoploid and mixed-ploidy populations based on the vegetative tiller number and leaf weight in principal component analysis (Figure 3). Octoploid populations clustered into the group which was also characterized by higher plants, longer and wider leaves, late heading and larger biomass yield. The variation of morphological trait values was low in the group of tetraploid populations, originating from North Dakota. These populations were more resistant to over-wintering conditions and had higher panicle weight.

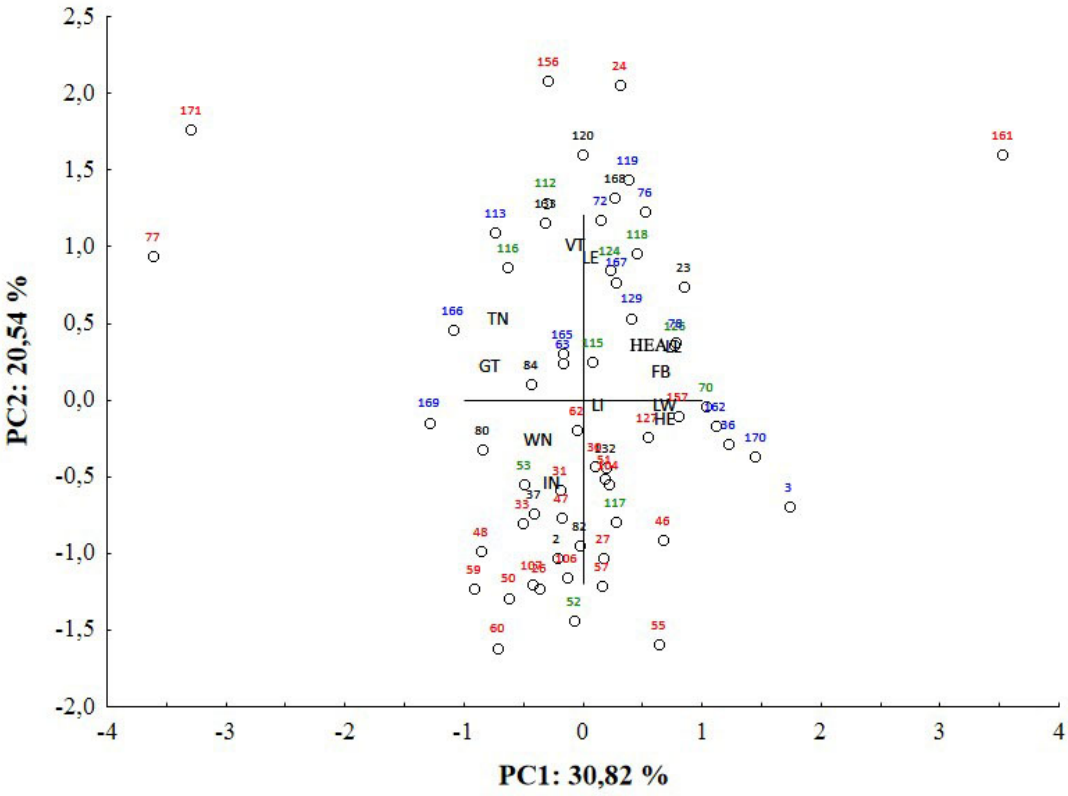


Figure 3. Principal component analysis of switchgrass populations (n = 66) based on morphological and economically useful traits. Red marked populations are tetraploid, blue – octoploid, green – mixed ploidy, black – ploidy not detected. WN – overwintering, LL – leaf length, LW – leaf width, HE – height, FB – fresh biomass, TN – number of stems, GT – number of generative tillers, VT – number of vegetative tillers, LE – leafiness, LI – length of inflorescence, IN – weight of inflorescence, HEA – heading earliness

Switchgrass biomass yield and dynamic of productivity

The above-ground dry matter yield of switchgrass throughout the fourth-year growth, when grass was cut once or twice per season, is shown in Figure 4. In the first treatment, when grass was cut once at seed maturity, the dry matter yield was always higher compared to two cuts: in the first harvest year 21.46 % higher, second harvest year – 89.31 % higher, third harvest year – 154.40 % higher, fouth harvest year – 122.65 % higher. In the second treatment, when grass was cut twice per season (at the beginning of anthesis and after re-growth of the aftermath) the dry matter yield in the first harvest year was 199.70 g plant^{-1}. However it significantly decreased with the plant age ($P<0.01$). The annual decrease was 15.93 % (2014), 32.79 % (2015) and 23.36 % (2016) lower compared to one cut.

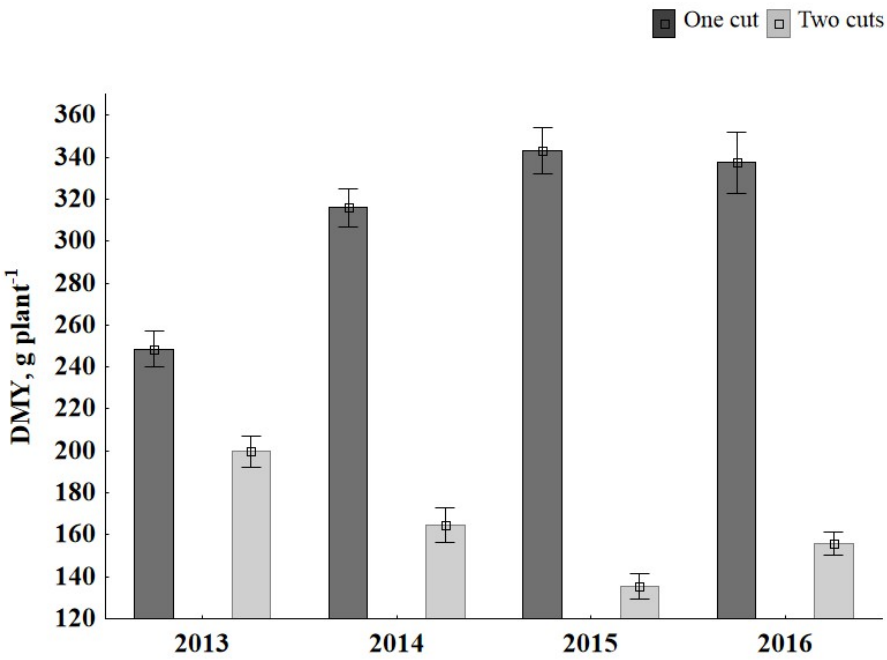


Figure 4. Dry matter yield (DMY) of switchgrass harvested once and twice per season in 2013 – 2016. Error bars indicate standard error of the mean

The best-performing accessions based on the increase over mean yield over four harvesting years were identified. When the grass was harvested once per season, the highest yielding accessions were No. 23, 46, 106, 115, 117, 118 and 124 as well as cultivars 'Forestburg' and 'Cave in Rock'. In the second treatment, when the grass was harvested twice per season, the highest yielding accessions were No. 57, 115, 116, 118, 130 and 131. These best-performing accessions with higher dry matter yield are acknowledged as valuable genetic source for future breeding projects.

The current study, comparing four years biomass partitioning among ploidy groups under single harvest system revealed that mixed-ploidy populations maintained their superiority over tetraploid and octoploid populations and significantly out-yielded them

(Figure 5). For example, in the first harvest year when the accessions had been harvested once per season the yield was very similar: a small variation in the dry matter between the ploidy groups was seen but significant differences were not detected. However, in the second and subsequent years, the yields between the ploidy groups differed significantly, and the difference was increasing every year. The mixed-ploidy populations produced the highest dry matter yield in the third and fourth harvest year (399.38 and 406.45 g plant^{-1} respectively), and octoploid populations – in the third year (367.63 g plant^{-1}).

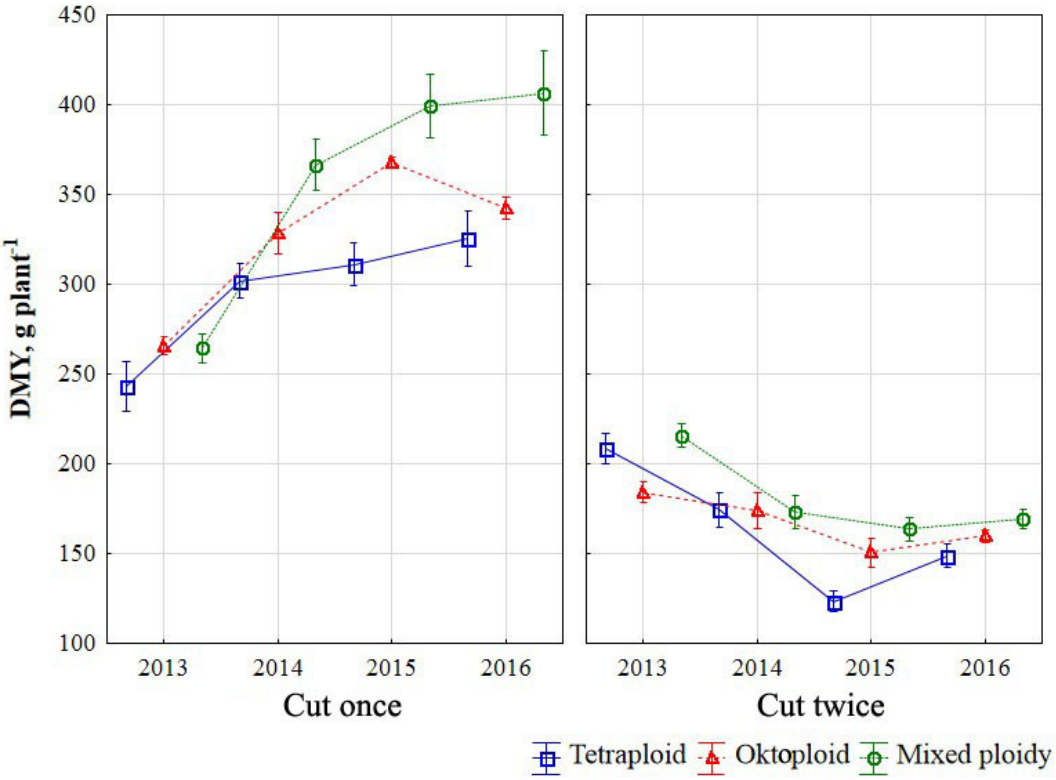


Figure 5. Dry matter yield (DMY) of switchgrass wild populations differing in ploidy level when cut once and twice per season in 2013 – 2016 year. Error bars indicate standard error of the mean

Switchgrass yields among ploidy groups as affected by two cuts frequency varied by year. In the first harvest year, the yield of tetraploid and mixed-ploidy populations was slightly higher than in octoploid populations. In the second harvest year, no significant differences in yields between the tested ploidy groups were observed. Despite the tendency of the yield to significantly decrease with the plant age, it is interesting to note that in the third harvest year octoploid and mixed-ploidy populations produced higher annual dry matter yield comparing with tetraploids. Switchgrass yields typically are positively related to rainfall during the growing season Precipitation during the 2015 growing season was 55 mm below historic averages for the research site. Moreover, hydrothermal coefficient HTK=0.1 indicated very strong drought in August. The yield stability of mixed-ploidy populations in 2015 may reflect greater plasticity in part due to increased ploidy. It is believed that an increase in chromosome number in polyploid plant populations enhan-

ces the level of heterozygosity and creates prerequisites for better adaptation of the species, i.e. increases its adaptability across a broad geographic range (Parisod et al., 2010). Warner et al. (1987) concluded that polyploidy can influence physiological activities such as photosynthesis. Therefore, increased scientific knowledge on how stresses limit the productivity of different ploidy groups is needed in order to move forward and further improve the productivity and sustainability of switchgrass.

Switchgrass crop dry matter yield is significantly affected by the weather conditions, harvesting time and genotype. The highest dry matter yield over two years of harvesting was obtained in cuts made in DOY 216 – 221 (4.64 t ha^{-1} average) and DOY 277 – 279 (4.90 t ha^{-1} average) (Figure 6). The dry matter yield of switchgrass crop at the beginning of winter (DOY 333 – 337) decreased by 14.69 % on average compared to September harvest. When the crop was left in the field over-winter, the dry matter yield in spring (DOY 90 – 91) was 51.63 % lower compared to September (2.37 t ha^{-1} average). The dry matter yield of switchgrass crop significantly increased in the second year of harvesting and this trend was detected in all cuts. The dry matter yield in the second year was 26.89 % higher in August and 60.43 % higher in December compared to first year harvest.

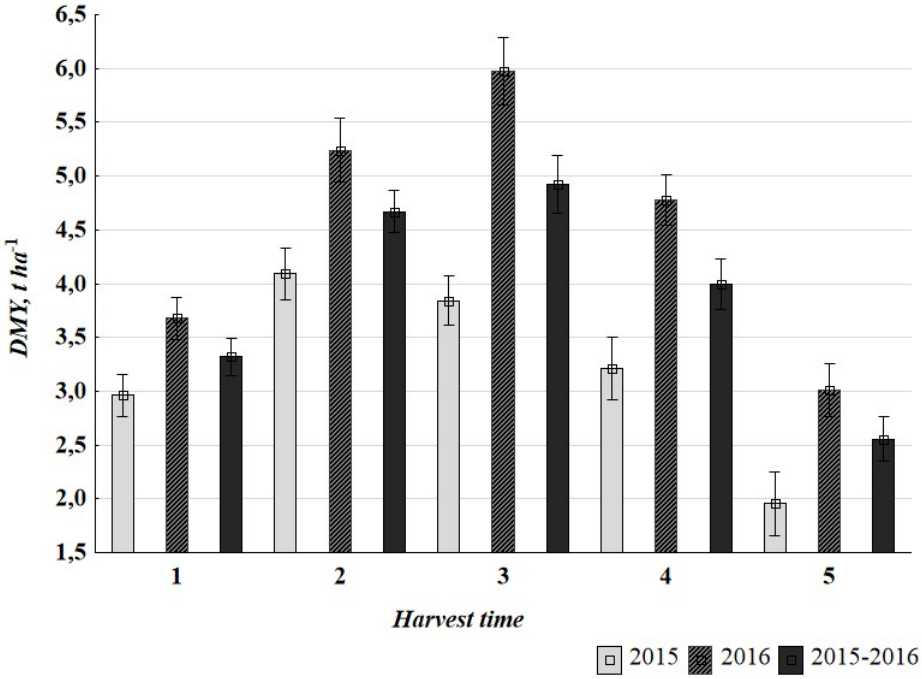


Figure 6. The average dry matter yield (DMY) of switchgrass crop at different harvest time in 2015 and 2016. Harvest time is expressed as day of year after 1 January: 1 – 194; 2 – 216 and 221; 3 – 279 and 277; 4 – 337 and 333; 5 – 90 and 91. Error bars indicate standard error of the mean

The comparison of dry matter yield of three cultivars and one hybrid population over two years demonstrated that cultivar 'Cave in Rock' was the most productive. The average dry matter yield of this cultivar was 6.65 t ha^{-1} in September (harvested in DOY

279). The yield decreased by 11.87 % in December and by 50.52 % in March. Similar trends were recorded for the rest of cultivars and hybrid population.

The biomass moisture content of switchgrass crops after over-wintering, in March, was 14.97 % (two year average). The biomass moisture when harvesting was done in the beginning of winter was also optimal (33.12 %). No significant differences in late winter – early spring cut biomass moisture were recorded between the cultivars and hybrid populations. However in September the differences were much more apparent: cultivar 'Dacotah' biomass moisture was significantly lower (42.05 %), and cultivar 'Cave in Rock' biomass moisture was significantly higher (54.54 %).

Chemical composition of switchgrass biomass

The assessment of organic compound content and its dynamics is important for the evaluation of suitability of switchgrass genotypes for biofuel production as well as its impact on the environment. Our results demonstrated that organic compound content and variation was highly dependent on environmental conditions and timing of harvesting. The concentration of C was significantly higher during first year of harvesting compared to the second year of harvesting. In both years the C content was highest when switchgrass plants were harvested in DOY 277 – 279 (493.2 g kg^{-1} dry matter yield in average) (Table 3). The highest carbon gain (t ha^{-1}) was recorded when plants were cut in DOY 216 – 221 (2.26 t ha^{-1}) and DOY 279 – 277 (2.42 t ha^{-1}) based on two year average. The biomass carbon gain was significantly influenced by plant genotype with cultivar 'Cave in Rock' being the most productive in terms of C carbon gain (3.24 t ha^{-1} in average).

Table 3. The concentration of C, N and C:N ratio of switchgrass biomass depending on harvest year and harvest time in 2015–2016 m.

Day of Year[1]	***Year***	**C**	**N**	**C:N**
		g kg^{-1} DM		
		Mean±SE	***Mean±SE***	***Mean±SE***
194	2015	480.60±0.09	9.97±0.21	38.06±1.28
	2016	481.32±0.06	10.12±0.10	47.56±0.49
216 – 221	2015	484.17±0.09	9.97±0.10	48.60±1.04
	2016	485.17±0.09	8.35±0.32	58.33±2.13
279 – 277	2015	496.72±0.07	6.47±0.35	77.46±4.18
	2016	489.67±0.08	6.60±0.76	76.92±7.94
279 – 277[2]	2015	485.75±0.09	12.13±0.32	40.09±0.97
	2016	480.33±0.10	10.34±0.53	46.83±2.46
Average of trial		485.47	9.25	54.23
Factor: Year				
LSD_{05} / LSD_{01}		0.69 / 0.93	0.28 / 0.38	2.43 / 3.31
Factor: Cut				
LSD_{05} / LSD_{01}		1.19 / 1.62	0.48 / 0.66	4.21 / 5.73
Interaction: Year x Cut				
LSD_{05} / LSD_{01}		1.82 / 2.48	0.74 / 1.01	6.43 / 8.75

[1] *day of year in 2015 and 2016*
[2] *aftermath from first cut at day 194*

The nitrogen content in switchgrass biomass was significantly influenced by environmental conditions, harvesting time and an interaction between these factors. Biomass N concentration in the first year of harvesting was 9.64 g kg^{-1} dry matter yield in average and decreased by 8.19 % in the second year of harvesting. The average N content in the first cut biomass (performed in DOY 194) was 10.04 g kg^{-1} dry matter yield; the average aftermath biomass N content was 11.23 g kg^{-1} dry matter yield. The average C:N ratio in the first year was lower by 11.07 % compared to the second year of harvesting. The lowest C:N ratio was assessed in the biomass, cut in the July of the first year of harvesting (38.06 in average).

The harvesting time was the main factor influencing Klason lignin concentration in the switchgrass biomass. The later the date of harvesting, the higher lignin content was recorded, reaching the peak (226.17 g kg^{-1} dry matter yield) in the biomass, harvested at the beginning of winter (DOY 333 – 337) (Figure 7). ADF and NDF concentrations were the highest in the biomass harvested at the end of vegetation season, at DOY 277 – 279 day of the year (456.33 g kg^{-1} dry matter yield and 740.16 g kg^{-1} dry matter yield).

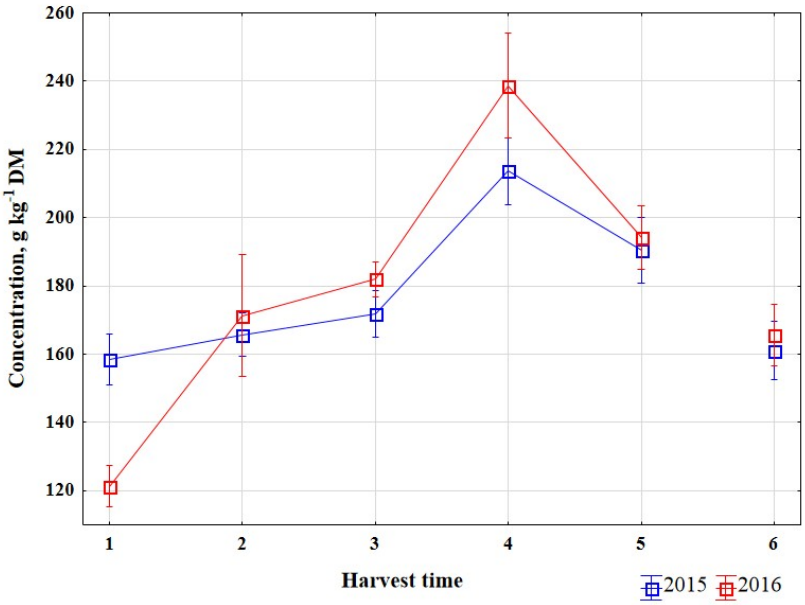


Figure 7. The concentration of Klason lignin in switchgrass biomass at different harvest time in 2015 and 2016. Harvest time is expressed as day of year after 1 January: 1 – 194; 2 – 216 and 221; 3 – 279 and 277; 4 – 337 and 333; 5 – 90 and 91; 6 – aftermath from first cut. Error bars indicate standard error of the mean

The biomass cellulose content followed the same tendency of increasing in the later cuts; the mean concentration in the youngest plants (BBCH 4-5) was 340.55 g kg^{-1} dry matter yield, whereas the biomass of plants cut at the end of the season (DOY 277 – 279) contained 381.4 g kg^{-1} dry matter yield of cellulose. The highest hemicellulose concentration was recorded in the first cut biomass (313.5 g kg^{-1} dry matter yield, harvesting made in July), it decreased in the subsequent cuts. Significant differences were recorded between the lignocellulose compound concentration in different parts of the plant. The highest degree of lignification was estimated in the tillers of the plants, harvested at the

end of the growth season. Cellulose and hemicellulose in plant tillers comprised more than 86 % $\sum CH_2O$.

The dynamics of non-structural carbohydrate content was highly dependent on harvesting time and environmental conditions. The WSC and starch content was higher in the plant biomass of the first harvesting year than the second year. Based on two year data the starch content was higher in the first cut at DOY 194 (105.06 g kg^{-1} dry matter yield), and the aftermath biomass was richer in WSC (83.91 g kg^{-1} dry matter yield). At the end of the growing season switchgrass panicles and leaves contained higher concentrations of non-structural carbohydrates (18.98 % and 16.88 %).

The switchgrass biomass, harvested in the early cuts, can be suitable for biogas production, feed or compost due to its higher N, $\sum CH_2O$ and lower C:N ratio compared to the later cuts. The quality of the chemical composition of the aftermath biomass was lower than the first cut biomass in terms of its suitability for biogas production. The biomass harvested in late cuts can be more suitable for solid biofuel production. If the harvesting was made at the seed ripening stage the plants, especially their tillers, can be used as stock for second-generation bioethanol or solid biofuel production.

The average ash content was lower by 14.73 % in the first year biomass compared to second year biomass. Performing the cuts later in year tended to significantly decrease the biomass ash content. The lowest ash content was recorded in the biomass, harvested after winter, in March (32.53 g kg^{-1}). When the ash content of different plant parts was compared, the results demonstrated that it was the lowest in the tillers and comprised only 27.18 g kg^{-1} dry matter yield.

The concentrations of mineral elements decreased in the late cuts (Figure 8).

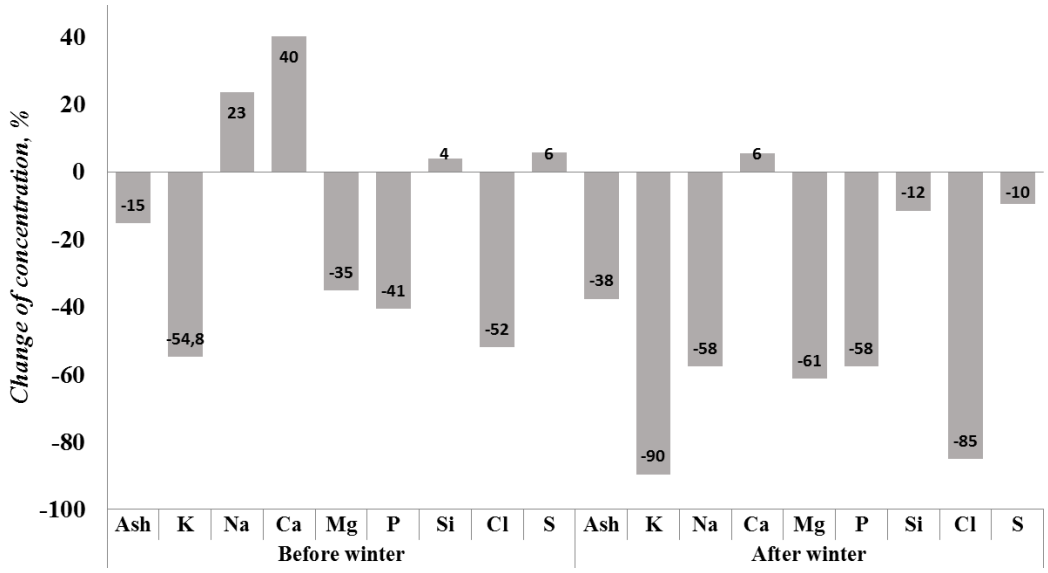


Figure 8. The average change of ash and mineral elements in switchgrass biomass from October until early December (before winter) and early March (after winter) in 2015–2016 year

The highest decrease in biomass K and Cl content was recorded from September to March: K concentration decreased by 89.60 %, and Cl concentration decreased by 85.2

%. The concentration of phosphorus was estimated to be up to 1.1 g kg^{-1} dry matter yield in the biomass harvested in September, but it got lower by 58.18 % in the biomass harvested in March. Mg and Na biomass content decreased by 61.64 % and 70 % respectively, from September to March. The highest Ca content was assessed in the biomass harvested before winter, 6.09 g kg^{-1} dry matter yield on average. The S concentration was the highest in September (0.92 g kg^{-1} dry matter yield) in the first year of harvesting, but in the second year the highest S concentration was recorded in December (0.90 g kg^{-1} dry matter yield). Si content was mostly uniform in the cuts, but differed among the years of harvesting: in the first year it was 2.54 g kg^{-1} dry matter yield, and in the second year the mean concentration was 3.37 g kg^{-1} dry matter yield.

The tillers contained less ash, Mg, Si, P and S compared to the leaves and panicles. Ca, Mg and Si concentrations were the highest in the leaves, and panicles contained more of the elements, constituting the proteins. The mean concentrations of K and Cl in the tillers and panicles were similar.

Principal component analysis demonstrated the relationships between biomass chemical composition, agro-biological traits and geographic origin of switchgrass populations (Figure 9, 10).

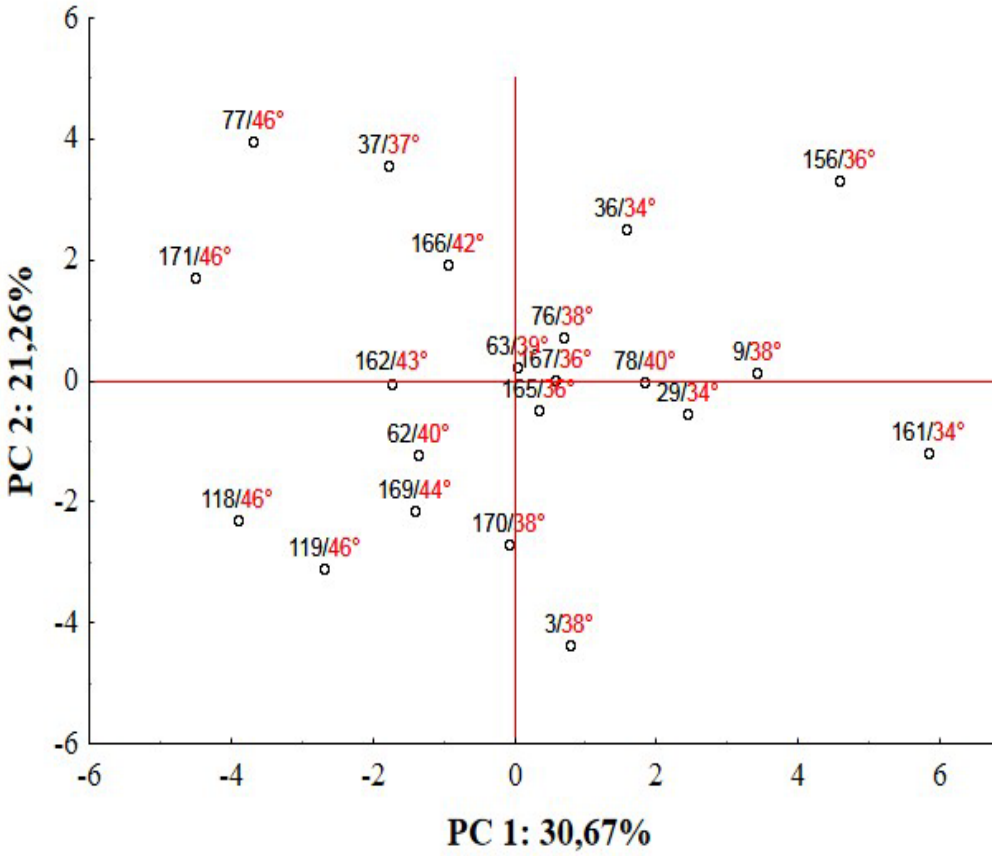
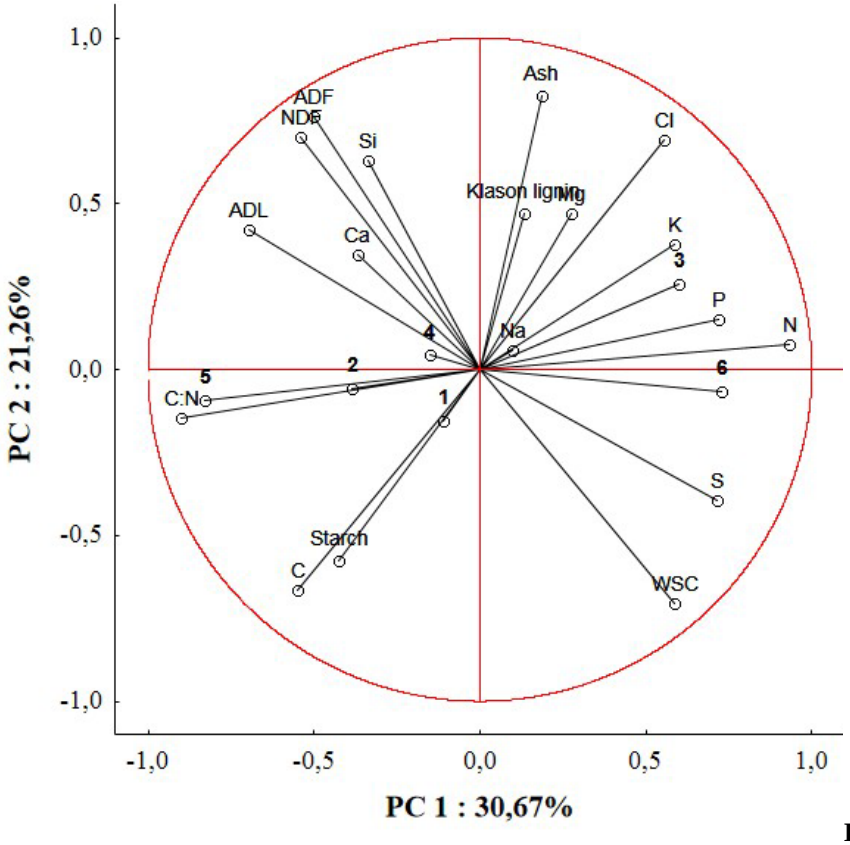


Figure 9. Principal component analysis of switchgrass populations (n = 21) based on biomass chemical content and agrobiological traits. Accessions numbers are presented in black and latitude of their geographic origin – in red.



B

Figure 10. Pattern of relations between indicators of switchgrass biomass chemical content and agrobiological traits. 1 – leafiness, 2 – percent of stems per plant, 3 – percent of inflorescences per plant, 4 – stems-leaf ratio, 5 – geographic origin, 6 – heading earliness

Tiller:leave ratio, tiller percentage per plant, biomass C:N ratio separated the northern and the southern populationsof switchgrass. The biomass of the northern populations contained more cellulose, C, starch, higher C:N ratio whereas southern populations had higher N, P, K, Cl, Mg and S concentrations in their biomass. The biomass quality traits also correlated with the heading date. PCA results simplified the grouping of switchgrass populations according to their biomass quality and agro-biological traits as well as facilitated the selection of the genotypes most suitable for biogas, second generation bioethanol or solid biofuel production.

CONCLUSIONS

1. Wild switchgrass ecotypes originating from North Dakota, USA, do not undergo winter damage under Lithuanian conditions. Populations originating in the southern regions of USA suffer severe winter injuries or get killed completely.
2. Switchgrass vegetation lasts for 160 days on average under Lithuanian conditions. The plant development from heading to full ripening takes 80 days on average. The temperature requirements for full seed ripening (BBCH 8) are 735 – 960 growing degree days. The earliest switchgrass population reach the stage of ripening at the start of September. The populations originating to the south of 38° Northern latitude do not undergo all developmental stages during vegetation season under Lithuanian conditions.
3. Switchgrass is a highly polymorphic species. Tiller number per bunch, seed yield and 1000 seed weight were the most variable traits; plant height and bunch diameter were the most stable. The different ploidy groups are distinguished according to the plant vegetative tiller number and leaf weight. The weight and diameter of generative tillers can be used in switchgrass genotype screening as indirect productivity indicator.
4. Switchgrass biomass yield tends to increase during the years of use if one cut is made during the season, but decrease if two cuts are made. Octoploid and mixed-ploidy populations are better yielding than tetraploid populations. The highest yield differences were recorded during the droughty year, indicating that populations with higher ploidy level have a wider ecological amplitude.
5. Harvesting time plays an important role in switchgrass biomass yield and its moisture content. The highest dry matter yield during the vegetation season was recorded in September (up to 5.97 t ha^{-1}). After the end of vegetation the dry matter yield significantly decreases, up to 14 % in winter and 51 % in early spring. However the biomass contains less moisture in early spring compared to winter (14 % and 33 % moisture content, respectively). Therefore the most optimal switchgrass cutting time is right after frosts or at the beginning of winter if the biomass is intended to be used for biofuel.
6. Switchgrass biomass harvested in July (BBCH 5) contains more N and $\sum CH_2O$, less lignin and the C:N ratio is lower compared to later harvests, therefore it is most suitable for biogas, feed or compost production. When cuts are made at the seed ripening or senescence stages (BBCH 8 – 9) the biomass is more suitable for solid biofuel due to decrease in ash and most of the mineral element contents, or it can be used for second generation bioethanol production as the biomass contains highest levels of lignocellulose at these plant growth stages.
7. The tillers contain the least amount of ash and mineral elements, the concentration of Ca, Mg and Si are the highest in the leaves; and panicles at the stage of seed ripening contain more P and S. The Cl and Na content is uniform in different plant organs.
8. Thirteen wild ecotypes (Nr. 23, 46, 57, 106, 113, 115, 116, 117, 118, 119 124, 130, 131) as well as cultivars 'Forestburg' and 'Cave in Rock' demonstrated superior biomass yield and quality and therefore can be used for biofuel production in European Nemoral zone. They can also be used in switchgrass breeding programmes aimed at creating new cultivars, adapted to the local conditions.

LIST OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS ON THE DISSERTATION TOPIC

Articles in periodical scientific publications with a citation index (Impact Factor) according to Clarivate Analytics Web of Science database

1. **E. Norkevičienė**, N. Lemežienė, J. Cesevičienė, B. Butkutė. 2016. Switchgrass from North Dakota – a new bioenergy crop in the nemoral zone of Europe. Communications in Soil Science and Plant Analysis Vol. 47 No. Sup. 1: 64–74.
2. Dabkevičienė G., Lemežienė N., **Norkevičienė E**., Liatukas Ž., Cesevičienė J., Armonienė R., Butkutė B. 2015. Variability of nuclear DNA content and agromorphological characteristics of switchgrass (*Panicum virgatum* L.) germplasm in Lithuania. Zemdirbystė–Agriculture, 102 (2): 153–158.
3. Lemežienė N., **Norkevičienė E**., Liatukas Ž., Dabkevičienė G., Cesevičienė J., Butkutė B. 2015. Switchgrass from North Dakota – an adaptable and promising energy crop for northern regions of Europe. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B: Soil and Plant Science, 65 (2): 118–124.

Other peer-reviewed publications

1. **E. Norkevičienė**, V. Kemešytė, G. Dabkevičienė, B. Butkutė. 2016. Yield of Lithuania-grown switchgrass populations differing in ploidy level. Agriculture & Food, Volume 4: 74–84.
2. Butkutė B., Cesevičienė J., **Norkevičienė E**. 2014. Development of low-cost and rapid method for the evaluation of organic and inorganic components in switchgrass biomass. The 11th international conference of young scientists on energy issues CYSENI. Kaunas, p. 69–78.

Monographs, books, textbooks and their sections published by international publishers

1. Butkutė B., Cesevičienė J., Lemežienė N., **Norkevičienė E.**, Dabkevičienė G., Liatukas Ž. 2014. The variation of ash and inorganic elements concentrations in the biomass of Lithuania-grown switchgrass (*Panicum virgatum* L.). In: A. Sayigh (ed.) Renewable Energy in the Service of Mankind, Vol I, Chapter 8. Springer International Publishing Switzerland, p. 75–90.

Abstracts in the conference proceedings

1. **Norkevičienė E**., Butkutė B. 2018. Rykštinės soros (*Panicum virgatum* L.) agrobiologinis potencialas Europos vėsiojo vidutinio klimato sąlygomis. // Agrariniai ir miškininkystės mokslai: naujausi tyrimų rezultati ir inovatyvūs sprendimai. Mokslinės konferencijos pranešimai Nr. 8, p. 47–49.
2. **Norkevičienė**, **E**. 2017. Phenology, overwintering and yield performance of switchgrass cultivars grown in Lithuania. // 4th International Vavilov Conference „N. I. Vavilov`s Ideas in the Modern World“, Saint-Petersburg, Russia, p. 341.
3. Lemežienė N., Stukonis V., Kemešytė V., Liatukienė A., **Norkevičienė E.** 2017. Daugiamečių žolių kolekcijų plėtra ir genetinių išteklių polimorfiškumo tyrimai. Įvairios paskirties Lietuvoje mažai kultivuojamų rūšių selekcija. // Agrariniai ir

miškininkystės mokslai: naujausi tyrimų rezultati ir inovatyvūs sprendimai. Mokslinės konferencijos pranešimai Nr. 7, p. 93–94.

4. **Norkevičienė E.** 2015. Rykštėtosios soros (*Panicum virgatum* L.), kaip kietojo biokuro šaltinio, įvertinimas pagal mineralinę biomasės sudėtį. // IV Jaunųjų mokslininkų konferencijos „Jaunieji mokslininkai žemės ūkio pažangai" pranešimų tezių rinkinys, p. 30.
5. **Norkevičienė E.**, Butkutė B., Lemežienė N., Cesevičienė J., Kemešytė V. 2015. The potential of swichgrass for bioenergy production in comparison to reed canary grass under cool temperate climate conditions. // European Biomass Conference and Exhibition Proceedings, 23rd EUBCE, Viena, p. 127–134.
6. **Norkevičienė E**. 2014. Rykštėtosios soros (*Panicum virgatum* L.), kaip bioenerginio C4 augalo, genetinės kolekcijos tyrimai Lietuvoje. // III Jaunųjų mokslininkų konferencijos „Jaunieji mokslininkai žemės ūkio pažangai" pranešimų tezių rinkinys, p. 40.

Popular press articles

1. **Norkevičienė E**., Lemežienė N., Butkutė B. 2015. Rykštėtosios soros – biokuro gamybai. Mano ūkis, gegužė, p. 32–36.
2. **Norkevičienė E**. 2014. Augalai ateities pasauliui. Ūkininko patarėjas, Nr. 130 (3238), p. 8–9.

INFORMATION ABOUT THE PHD STUDENT

Eglė Norkevičienė was born on December 1, 1982 in Raseiniai. In 2001, she finished "Kalnas" secondary school in Raseiniai, Lithuania and entered Vilnius University. In 2005, she obtained a Bachelor's degree in Biology. In 2017, she graduated Vilnius University with a Master's degree in Biology. In 2013–2017, she did the PhD studies at the Lithuanian Research Centre for Agriculture and Forestry. Since 2013, E. Norkevičienė started works as a junior researcher at the Grass Breeding Department of the Institute of Agriculture, Lithuanian Research Centre for Agriculture and Forestry.

ACKNOWLEDGEMENTS

I am sincerely grateful to the supervisor of my dissertation dr. Bronislava Butkutė and scientific consultant dr. Nijolė Lemežienė for their valuable advice, encouragement, patience, ingenious guidance, as well as assistance in writing scientific publications and thesis.

Thanks to all the employees of Grass Breeding Department, Chemical Research Laboratory and Laboratory of Genetics and Physiology for their practical advice and assistance in the research and laboratory analyses.

Many thanks to my friends Daiva, Bernd Gliwa, Arūnas and Ričiardas who advised, supported, and encouraged me.

Most of all I would like to thank my daughter Urte, my husband Donatas and my Parents for leading me firmly toward the goal. Dear Family, thank you for being my biggest supporters.

PADĖKA

Nuoširdžią padėką skiriu mokslinio darbo vadovei dr. Bronislavai Butkutei už idėjas, patarimus, pastabas, pasiūlymus, už visą man skirtą laiką, energiją, kantrybę ir išmintį.

Esu labai dėkinga mokslinio darbo konsultantei dr. Nijolei Lemežienei už vertingas mokslines konsultacijas ir patarimus rengiant mokslines publikacijas ir disertaciją.

Esu dėkinga visam Žolių selekcijos skyriaus kolektyvui už nuoširdžią pagalbą vykdant mokslinius tyrimus ir draugišką darbų atmosferą.

Dėkoju LAMMC Žemdirbystės instituto Cheminių tyrimų laboratorijos bei Genetikos ir fiziologijos laboratorijos kolegoms už atliktas įvairias analizes.

Dėkoju draugams Daivai ir Bernd Gliwa bei Arūnui ir Ričardui už mokslines ir gyvenimiškas diskusijas, palaikymą ir padrąsinimą.

Labiausiai noriu padėkoti dukrai Urtei, vyrui Donatui ir Tėveliams už visą kartu nueitą kelią tikslo link ir nuolatinį skatinimą tobulėti. Širdingas ačiū visai šeimai už tai, kad visada buvo šalia.

Eglė Norkevičienė

RYKŠTINĖS SOROS (*PANICUM VIRGATUM* L.) AGROBIOLOGINIS POTENCIALAS EUROPOS NEMORALINĖJE ZONOJE

DAKTARO DISERTACIJA

SANTRUMPŲ SĄRAŠAS

$\sum CH_2O$ – struktūrinių bei nestruktūrinių angliavandenių suma
ADF – rūgštaus detergento tirpale netirpi ląsteliena
ADL – rūgštaus detergento tirpale netirpus ligninas
ATP – adenozintrifosfatas
C:N – anglies ir azoto santykis biomasėje
C_3 – fotosintetinis anglies asimiliavimo kelias (Kalvino ciklas)
C_4 – fotosintetinis anglies asimiliavimo kelias (Hetčo-Sleko ciklas)
Cel – celiuliozė
df – laisvės laipsnių skaičius
ES – Europos Sąjunga
ETS – efektyvių temperatūrų suma
F – Fišerio kriterijus, naudojamas tikrinant dviejų imčių dispersijų lygybę
$F_{fakt.}$ – apskaičiuota F reikšmė
HCel – hemiceliuliozė
HHV – aukštutinė degimo šiluma
HTK – Selianinovo hidroterminis koeficientas
JAV – Jungtinės Amerikos Valstijos
LAMMC – Lietuvos agrarinių ir miškų mokslų centras
LSD – mažiausias esminis skirtumas
m. d. – metų diena
MS – kvadratų sumų vidurkiai
NDF – neutralaus detergento tirpale netirpi ląsteliena
p – tikimybės lygmuo
PC1 – pirma pagrindinė komponentė
PC2 – antra pagrindinė komponentė
PC3 – trečia pagrindinė komponentė
r – koreliacijos koeficientas
s. l. – plačiąja prasme (lot. *sensu lato*)
s. s. – siaurąja prasme (lot. *sensu stricto*)
SD – standartinis nuokrypis
SE – vidurkio paklaida
SKN – standartinė klimato norma (1981-2010 m.)
SM – sausos medžiagos
SMD – sausos masės derlius
SS – kvadratų suma
VTA – vandenyje tirpūs angliavandeniai
WGS – globalinė geocentrinė koordinačių sistema
ŽI – Žemdirbystės institutas
ŽL – žalia ląsteliena
ŽM – žalia masė
ŽMD – žalios masės derlius

ĮVADAS

Didėjantis energijos poreikis, senkantys iškastinio kuro ištekliai bei šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijos skatina ieškoti alternatyvių energijos šaltinių (Robbins et al., 2012). Europos Sąjungos šalyse vis plačiau realizuojama idėja, kad augalų biomasė yra ne tik maisto, pašaro, pluošto, ateities pramonės, bet ir energijos žaliava (Nielsen et al., 2007). Vykdant aplinkos apsaugos reikalavimus svarbu mobilizuoti naujų, nemaistinės paskirties augalų, biomasės išteklius (Hochman et al., 2008). Susiformavus ir išsiplėtojus energinių augalų tyrimams numatoma, kad C_4 fotosintezės kelio augalai gali būti inovatyvus sprendimas ateities pramonės plėtrai (Samson et al., 2005; Byrt et al., 2011). C_4 augaluose fotosintezės pirminis produktas turi keturių anglies atomų grandinę. Tokie augalai pranašesni fiziologinėmis savybėmis: dėl mažo fotokvėpavimo intensyvumo jie yra produktyvesni ir pakantesni ilgalaikėms sausroms bei temperatūrų svyravimams (Brutnell et al., 2010).

Tik nedaugelis C_4 fotosintezės kelio rūšių pasižymi gera adaptacija Europos vėsiojo vidutinio klimato sąlygomis. Dažniausiai tai ekologiškai plastiškos, greitai prisitaikančios prie vietinių sąlygų žemės ūkio pasėlių piktžolės ar urbanizuotų pirminių buveinių rūšys (*Setaria viridis, Echinochloa crus-galli, Digitaria sanguinalis* ir kt.) (Motiekaitytė, 2002; Vainorienė, 2016). Introdukuojant ir aklimatizuojant ūkiškai naudingus C_4 augalus Šiaurės Europos šalyse susiduriama su nemažai problemų. Dažnai šiltesnių kraštų augalai, pvz. *Pennisetum purpureum, Miscanthus × giganteus, Spartina pectinata,* blogai žiemoja ir iššąla (Sage et al., 2015). Kai kurie jų (*M. × giganteus*) – negali subrandinti gyvybingų sėklų.

Vykdant naujų C_4 energinių augalų paieškas Europoje atkreiptas dėmesys į rykštinę sorą (*Panicum virgatum*) (Alexopoulou et al., 2008; Smeets et al., 2009). Tai daugiametė, kryžmadulkė miglinių šeimos rūšis, kilusi iš Šiaurės Amerikos (Casler, 2012). Ten rykštinė sora tradiciškai auginama dirvų apsaugai nuo erozijos, pašarui, vėlyvam pavasariniam ganymui. Pastaraisiais metais rykštinė sora naudojama kaip energinis augalas kietojo biokuro, antros kartos bioetanolio ir biodujų gamybai (Lewandowski et al., 2003; Parrish, Fike, 2005).

Lyginant su vienamečiais ar C_3 fotosintezės augalais rykštinė sora turi daug pranašumų. Ji gali užauginti didelį biomasės derlių, yra ilgaamžė, efektyviai naudoja vandenį, todėl yra atspari sausrai. Rykštinė sora nereikli azotinėms trąšoms, jos biomasei užauginti nereikalinga naudoti augalų apsaugos priemonių, o derliaus nuėmimo sąnaudos taip pat yra minimalios (Mani, 2004; McLaughlin, Kszos, 2005; Samson, 2007). Europoje rykštinė sora, skirtingai nei *M. × giganteus* augalai, gali subrandinti gyvybingas sėklas (Iqbal et al., 2015). Todėl ši jos savybė yra svarus pranašumas.

Nors Pietų Europos šalyse susidomėjimas rykštine sora auga, tačiau duomenų apie jos adaptaciją Vidurio ir Šiaurės Europoje – trūksta (Elbersen et al., 2001; Robbins et al., 2012). Lietuvoje introdukuotos tik dekoratyvios rykštinės soros veislės. Žinių apie rykštinės soros genetinių išteklių aklimatizaciją, produktyvumo potencialą, auginimo būdus ir priežiūros priemones Lietuvos klimatinėmis, edafinėmis ir biologinėmis sąlygomis beveik nėra. Rykštinės soros veislių biomasės derlius, biomasės cheminė sudėtis ir jos tinkamumas biokuro gamybai tiek Lietuvoje, tiek ir kaimyninėse šalyse nėra ištirti. Šalies bioenergetikos pramonei svarbu atrinkti ir pasiūlyti laukines populiacijas ar veisles produktyvias vietinėmis agroekologinėmis sąlygomis ir pasižyminčias biomasės kokybe, tinkama biodujų, antrosios kartos bioetanolio ar kietojo biokuro gamybai.

Nagrinėjant rykštinę sorą kaip įvairios paskirties augalą itin aktualūs yra biomasės cheminės sudėties tyrimai. Žaliava skirta pašarui, įvairios rūšies biokurui, pramonės ga-

miniams turi skirtingus biomasės kokybės kriterijus (Guretzky et al., 2011). Rykštinės soros biomasės mineralinių ir organinių komponentų kaita priklauso nuo daugelio veiksnių (El-Nashaar et al., 2009; Lindsey et al., 2013), todėl biomasės cheminės sudėties kitimo dėsningumams nustatyti reikalinga atlikti plačius, įvairiapusiškus tyrimus (Butkutė et al., 2013a; Butkutė et al., 2013b). Tokių tyrimų Europos nemoralinės zonos šalyse (Lietuva, Latvija, Estija, Baltarusija, Švedija, Norvegija ir Suomija) atlikta labai mažai arba visai nėra.

Įvairūs tyrimai rodo, kad daugiamečių žolinių augalų energinis potencialas Lietuvoje yra labai didelis ir dalį iškastinio kuro būtų galima pakeisti žaliava iš jų biomasės (Jakienė ir kt., 2013). Tikimasi, kad energinės konversijos technologijų pažanga labai greitai leis sumažinti lignoceliuliozinės biomasės perdirbimo į įvairias biokuro formas išlaidas ir tai skatins spartesnę pramoninę energinių žolinių augalų paklausą.

Hipotezė. Prognozuojama, kad nauja Lietuvai C_4 fotosintezės kelio rūšis rykštinė sora (*Panicum virgatum* L.) gali būti perspektyvus ir produktyvus augalas, papildantis energinių atsinaujinančių išteklių įvairovę Europos nemoralinėje zonoje. Tikėtina, kad rykštinės soros populiacijų geografinė kilmė, ploidiškumo lygmuo ir taikomas pjūčių režimas yra svarūs veiksniai, lemiantys biomasės derlių ir kokybę.

Tyrimo tikslas. Kompleksiškai įvertinti rykštinės soros biologinius požymius bei ūkiškai naudingas savybes, nustatyti optimalų pjūčių režimą bei identifikuoti selekciniu požiūriu vertingiausią genetinę medžiagą, galinčią praplėsti energetinių augalų įvairovę, Europos nemoralinės zonos sąlygomis.

Tyrimo uždaviniai:

1. Ištirti rykštinės soros populiacijų morfologinius požymius ir ūkiškai naudingas savybes;
2. Ištirti pjūčių skaičiaus ir pjūčių laiko įtaką rykštinės soros produktyvumui genetinių kolekcijų augynuose bei pasėlyje;
3. Įvertinti pjūčių skaičiaus bei pjūčių laiko įtaką rykštinės soros biomasės cheminei sudėčiai bei cheminės sudėties komponentų pasiskirstymui augalų morfologinių frakcijų biomasėje;
4. Pagal biologinių požymių ir ūkiškai naudingų savybių visumą atrinkti vertingiausius rykštinės soros genetinius išteklius, tinkamus auginti Europos nemoralinėje zonoje.

Disertacijos ginamieji teiginiai:

5. Rykštinės soros biologiniai požymiai ir savybės sudaro galimybę introdukuoti šią rūšį Europos nemoralinėje zonoje.
6. Rykštinės soros populiacijų geografinė kilmė, ploidiškumo lygmuo ir taikomas pjūčių režimas yra svarbūs veiksniai, nuo kurių priklauso augalų biomasės derlius.
7. Rykštinės soros antžeminės biomasės cheminė sudėtis priklauso nuo taikomo biomasės pjūčių režimo, augalų morfologinių frakcijų bei populiacijų kilmės.
8. Pagal tirtų požymių visumą atrinkti vertingiausi rykštinės soros genetiniai ištekliai gali papildyti energinių atsinaujinančių išteklių įvairovę Europos nemoralinėje zonoje.

Mokslinis darbo naujumas. Pirmą kartą įvertinta rykštinės soros genetinių išteklių aklimatizacija Europos nemoralinėje zonoje. Tyrimai atskleidė, kad šios gamtinės zonos sąlygomis aukštųjų prerijų ekotipo populiacijos žiemoja geriausiai, anksčiau plaukėja ir spėja subrandinti sėklas, o populiacijos kilusios iš žemųjų prerijų – neperžiemoja. Įrodyta, kad mišraus ploidiškumo bei oktaploidinės rykštinės soros populiacijos užaugina daugiau biomasės nei tetraploidinės. Daugiakriteriniai skirtingu laiku nupjautos rykštinės soros produktyvumo ir biomasės cheminės sudėties tyrimai Europos nemoralinėje zonoje nebuvo iki šiol vykdyti. Atlikti tyrimai įrodė, kad šios gamtinės zonos sąlygomis rykštinės soros augalai didžiausią biomasės derlių užaugina pjaunant juos tik vieną kartą sėklų brandoje. Augalus pjaunant du kartus per sezoną – biomasės derlius kasmet mažėja. Įvertinus rykštinės soros produktyvumo dinamiką ir biomasės kokybę atskleista, kad tinkamesnė šios rūšies augalų energetinio panaudojimo paskirtis yra kietajam biokurui ir antros kartos bioetanoliui nei biodujoms gaminti.

Praktinė darbo reikšmė. Pagal augalų biologinius požymius ir ūkiškai naudingas savybes atrinkti ypač vertingi rykštinės soros genetiniai ištekliai, kurie papildys energinių atsinaujinančių išteklių įvairovę Europos nemoralinėje zonoje. Rezultatų visuma apie rykštinės soros fenotipinę ir genetinę įvairovę leis kontroliuoti požymių paveldėjimą ir užtikrins kokybiškos selekcinės medžiagos kūrimą. Atsižvelgiant į tyrimuose nustatytą rykštinės soros fenologinį vystymosi ritmą bus galima parinkti tinkamiausią šių augalų sėjos ir derliaus nuėmimo laiką, o nustatyti biomasės mineralinių ir organinių komponentų kaitos dėsningumai leis racionaliau pasirinkti pjūties laiką numatytos biokuro rūšies gamybai Europos nemoralinėje zonoje.

Tyrimų rezultatų aprobavimas. Disertacijos tema paskelbti 3 straipsniai žurnaluose, turinčiuose citavimo indeksą duomenų bazėje „Clarivate Analytics Web of Science", 2 straipsniai recenzuojamuose periodiniuose leidiniuose, 1 skyrius tarptautiniu mastu pripažintos mokslo leidyklos knygoje, 6 publikacijos mokslinių konferencijų leidiniuose. Rezultatai pristatyti 11 konferencijų užsienyje ir Lietuvoje.

Disertacijos struktūra ir apimtis. Disertacija parašyta lietuvių kalba. Disertacijos apimtis – 168 puslapiai. Ją sudaro: įvadas, literatūros apžvalga, tyrimų objektas, sąlygos ir metodika, rezultatai ir jų aptarimas, išvados, literatūros sąrašas, disertacijos tema paskelbtos publikacijos, daktaro disertacijos santrauka bei priedai. Disertacijoje pateikiama 12 lentelių, 40 paveikslų. Panaudoti 286 literatūros šaltiniai.

1. LITERATŪROS ANALIZĖ

1.1.Daugiamečių žolinių augalų biomasė bioenergijai

Europos Sąjungos (toliau – ES) aplinkosauginiai reikalavimai, susiję su šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijų bei atliekų mažinimu, skatina intensyviau diegti ir plėtoti atsinaujinančių energijos išteklių naudojimą (European Commission, 2016). Energijos gavyboje iš atsinaujinančių išteklių įžvelgiama eilė privalumų: mažėja iškastinio kuro vartojimas, stiprėja valstybių energetinė nepriklausomybė, mažėja dujų sukeliančių šiltnamio efektą emisijos, sprendžiamos socialinės, ekonominės problemos ir kt. (Dzejanavičienė ir kt., 2011; Shankar, 2017).

Atsižvelgdama į iškilusius aplinkosauginius ir energetinius iššūkius, 2014 m. Europos Komisija priėmė naują energetikos strategiją, kurios vienas iš tikslų – iki 2030 m. 27 proc. visos ES pagaminamos energijos gauti iš atsinaujinančių šaltinių (European Commission, 2014). Pasaulyje sparčiai auga saulės, vėjo, vandens, geoterminės energijos naudojimas. Tačiau plačiausiai naudojamas energijos šaltinis yra biomasė (Zeng-Hui, Hong-Bo, 2010; Proskurina et al., 2016). Biomasė – tai žemės ūkio (įskaitant augalinės ir gyvūninės kilmės medžiagas), miškų ūkio ir kitų susijusių pramonės šakų produktai ir atliekos ar šių produktų bei atliekų biologiškai skaidoma dalis, taip pat pramoninių ir buitinių atliekų biologiškai skaidoma dalis (Štyps ir kt., 2016). Augalų biomasė sudaro apie pusę atsinaujinančių energijos išteklių šiuo metu naudojamų ES, o ateityje – numatoma dar didesnė jos paklausa biokuro gamyboje (Proskurina et al., 2016, Börjesson et al., 2017). Priklausomai nuo augalinės biomasės struktūros ir konvertavimo į energiją technologijų, iš jos gali būti išgaunami dujiniai, skysti ir kieti biokuro produktai. Kitaip tariant, riebalus, angliavandenius ar celiuliozę kaupiantys augalai atitinkamai naudojami biodyzelino, bioetanolio, kietojo biokuro ar biodujų gamybai (Simmons, 2011).

Vertinant augalinės biomasės energinį potencialą, didžiausias dėmesys skiriamas medienos kurui bei iš jos gaunamiems biodegalams (Elbersen et al., 2012). Tačiau, intensyvus medienos vartojimas pasaulyje sukelia įvairias aplinkosaugines problemas ir skatina ieškoti alternatyvių biomasės šaltinių, tinkamų perdirbimui į energiją (Robbins et al., 2012). Nemaža biodegalų dalis pasaulyje pagaminama ir iš maistinių augalų biomasės – javų, runkelių, sojų, cukranendrių, rapsų, palmių ir kt. (Woiciechowski et al., 2016). Bioetanolis ES šalyse dažniausiai gaminamas iš krakmolingųjų (kvietrugių, rugių, žieminių kviečių, žieminių kvietrugių, bulvių) ir cukringųjų (cukrinių runkelių) rūšių augalų (Štyps ir kt., 2016). Didinant maistinių augalų auginimo apimtis reikalingi didesni žemės ūkio paskirties plotai, tai didina žemės naudojimo intensyvumą ir kelia grėsmę biologinei įvairovei (Pedroli et al., 2013). Negana to, biokuro gamyba iš maistui skirtų augalų, pasaulinėse rinkose gali sukelti maisto produktų deficitą (Tenenbaum, 2008). Dėl šių priežasčių, siekiama sumažinti maistinės paskirties augalų naudojimą bioenergetikoje (Zeng-Hui, Hong-Bo, 2010; Simmons, 2011).

Konkurencija tarp žemės ūkio augalų naudojimo maistui ir energijai gauti, gali būti sumažinta diegiant technologines inovacijas, tokias kaip antros kartos biodegalų gamyba. Antros kartos biodegalai – tai degalai, kuriems kaip žaliava naudojama lignoceliuliozės turinti biomasė. Siekiant tvaraus bioekonomikos vystymosi, etanolio gamyba iš lignoceliuliozinių žaliavų yra skatinama pasauliniu mastu (Eisentraut, 2010). Vartojant tokius biodegalus, CO_2 emisijas galima sumažinti iki 90 % lyginant su degalais pagamintais iš naftos, taip prisidedant prie pasaulinių aplinkosaugos problemų sprendimo (Jakienė ir kt., 2013). G. Hochman et al. (2008) prognozuoja, kad biokuro gamyba iš krakmolingų javų

ateityje sumažės, tačiau daugiau dėmesio bus skiriama lignoceliuliozinėms žaliavoms, t. y. medienai, žemės ūkio atliekoms bei aukštaūgėms žolėms. Panaši ir W. Wang (2016) nuomonė – lignoceliuliozinės biomasės poreikis antros kartos biodegalų gamybai ateinančiame dešimtmetyje išaugs. Vienas iš lignoceliuliozinės biomasės šaltinių yra daugiamečiai žoliniai augalai. Jų biomasė gali būti alternatyvi ateities pramonės energijos žaliava, papildanti tradicinius energijos resursus (Bentsen, Møller, 2017).

Daugiamečių žolių, kaip žaliavos energijai išgauti, auginimas turi daug privalumų, t. y. energiniai žolynai gali būti auginami prastose žemėse, kuriose tradicinių maistinių kultūrų auginimas yra neproduktyvus; juos galima naudoti jau kitais metais po sėjos; žolynus galima naudoti 10 ir daugiau metų nereikalaujant kasmetinio žemės dirbimo, sėklų pirkimo ir sėjos darbų; parinkus tinkamą žolių sudėtį galima išvengti mineralinių trąšų naudojimo; derliui doroti tinka įprasta žemės ūkio technika; išdžiovinta ar fermentuota žolynų biomasė gali būti saugoma gana ilgą laiką (Lewandowski et al., 2003; Kryževičienė, 2006; Zeng-Hui, Hong-Bo, 2010; Robbins et al., 2012; Kerckhoffs, Renquist, 2013). Nemažiau svarbi ir daugiamečių žolių teikiama aplinkosauginė nauda: dirvos apsauga nuo erozijos, vandens kokybės gerinimas, potencialių buveinių gyvūnijai sukūrimas, patrauklaus kraštovaizdžio formavimas ir kt. (Werling et al., 2014).

Literatūroje nurodoma, kad antros kartos biodegalų gamybai itin tinkamos aukštaūgės C_4 fotosintezės kelio žolės (Sanderson, Adler, 2008; Sims et al., 2010). Vienas iš svarbiausių C_4 augalų, kaip energinės žaliavos, pranašumų yra tai, kad jie pasižymi dvigubai didesniu fotosintezės intensyvumu, todėl greičiau auga ir būna daug produktyvesni nei C_3 augalai net ir maisto medžiagų stokojančiose augavietėse (Lewandowski et al., 2003; Byrt et al., 2011). Saulės energijos konversijos į augalo biochemines medžiagas efektyvumas C_4 augaluose siekia apie 3,7 %, o C_3 – tik 2,4 % (Zhu et al., 2010). Kitas, ne mažiau svarbus, C_4 augalų privalumas yra optimalesnis vandens naudojimas, o kartu ir didesnis atsparumas sausrai (Osborne, Freckleton, 2009). C_4 augalai sugeba koncentruoti CO_2 lapų renkamosiose ląstelėse, todėl lapų žiotelės dieną gali būti privertos, o fotosintezės intensyvumas lieka toks pat. Tokiu būdu C_4 augalai optimaliau naudoja vandenį: vieną gramą sausųjų medžiagų jie pagamina išgarinę 250–350 g vandens, o C_3 augalai – išgarinę 450 – 950 g vandens (Ghannoum et al., 2010).

Prognozuojama, kad per artimiausius 50 metų dėl globalinio klimato atšilimo, pagrindiniai augalų derlių mažinantys veiksniai bus aukštesnė oro temperatūra ir dažnos sausros (Sheffield, Wood, 2008). Todėl srityse, kuriose ypač tikėtini šie reiškiniai, strateginiais žemės ūkio augalais turėtų tapti kserotrofiniai C_4 fotosintezės kelio augalai, nes jie yra daug geriau prisitaikę prie besikeičiančių klimato sąlygų nei C_3 augalai (Byrt et al., 2011). Manoma, kad C_4 fotosintezė būdinga apie 7500 rūšių sausumos žiedinių augalų (Sage, 2004), natūraliai paplitusių aridinėse, tropinėse ar subtropinėse srityse. Šiltėjant klimatui ir didėjant drėgmės deficitui, atsiranda prielaidos šiuos augalus plačiau auginti ir šiauresnėse geografinėse platumose.

Taikomuoju požiūriu energinių daugiamečių žolių tyrimų kryptis yra ganėtinai nauja (Venturi, Venturi, 2003). Maždaug prieš keturis dešimtmečius (apie 1978 m.) Jungtinėse Amerikos Valstijose (JAV) pradėtos pirmosios energinių žolinių augalų paieškos (Zeng-Hui, Hong-Bo, 2010). Europoje panašūs tyrimai pradėti šiek tiek vėliau – apie 1983 m. (Venendaal et al., 1997). Tačiau, įvairių rūšių augalų tyrimai, skirti įvertinti jų biomasės energinei vertei, išlieka aktualūs ir šiandien. Šiuose tyrimuose labai svarbus uždavinys yra įvardinti prioritetinius energinius augalus. L. Zeng-Hui ir S. Hong-Bo (2010) išskiria tris pagrindinius energinių augalų atrankos kriterijus: 1) ekonominis efektyvumas, t. y. minimalios sąnaudos auginimo ir derliaus nuėmimo metu; 2) paprasta ir racionali au-

ginimo agrotechnika – mažas reiklumas dirvai, trąšų ir herbicidų naudojimui, atsparumas biotiniams ir abiotiniams stresoriams, lengvas derliaus nuėmimas ir kt.; 3) tinkama biomasės kokybė ir nesudėtinga biomasės konversijos į energiją sistema. Kiti autoriai (Venturi, Venturi, 2003; Kerckhoffs, Renquist, 2013) be minėtų kriterijų, svarbiais laiko ir invazyvumą, rūšies savaimiškumą (vietinę kilmę), adaptyvumą įvairiomis aplinkos sąlygomis, dauginamosios medžiagos prieinamumą, ne tik antžeminės, bet ir požeminės biomasės produktyvumą. Energinės fitomasės auginimas turi skatinti perėjimą prie aplinką tausojančio ūkininkavimo, nepažeidžiant dirvos maisto medžiagų ir vandens balanso, nesukeliant dirvos erozijos.

1984 metais JAV buvo atrinkta 18 rūšių, atitinkančių aukščiau išvardintus kriterijus ir įvardintų, perspektyviausiomis energinėmis žolėmis. Tai *Agropyron desertorum, Agrostis gigantea, Bromus inermis, Elymus hispidus* (sin. *Elytrigia intermedia*), *Elymus elongatus (*sin. *Elytrigia pontica*), *Festuca arundinacea, Phalaris arundinacea (*sin. *Phalaroides arundinacea*), *Phleum pratense, Andropogon gerardii, Cynodon dactylon, Eragrostis curvula, Panicum virgatum, Elymus smithii* (sin. *Pascopyrum smithii*), *Paspalum notatum, Pennisetum purpureum, Saccharum* spp., *Sorghum halepense, Tripsacum dactyloides.* Minėtos rūšys pasižymi didele biomasės produkcija ir tinkama jos chemine sudėtimi, gera adaptacija skirtingose augavietėse, lengva auginimo agrotechnika (Lewandowski et al., 2003). Daugelis jų iki šiol nėra sukultūrintos (Zeng-Hui, Hong-Bo, 2010). Todėl, šių rūšių tyrimai tęsiami ir šiandien. Naujausiuose tyrimuose JAV, kaip perspektyvi žaliava biokurui, nurodomos ne tik įvairios vietinės prerijų žolių rūšys, bet ir mažiau žinomos į Šiaurės Ameriką introdukuotos rūšys, pvz., *Elymus hispidus, E. elongatus* (Larson et al., 2017). Pietiniuose JAV regionuose, ypač perspektyviomis biokuro gamybai laikomos iš Rytų Azijos kilusios *Miscanthus sacchariflorus, M. sinensis* rūšys bei jų hibridai (Arundale et al., 2014; Kim et al., 2017).

Anot literatūros šaltinių, Europoje susidomėjimas daugiamečių žolių panaudojimu biokuro gamybai prasidėjo introdukavus *Miscanthus* genties augalus (Venendaal et al, 1997; Lewandowski et al., 2000). *Miscanthus* genties kilmės centras driekiasi nuo Pietryčių Azijos, per Kiniją ir Japoniją, pasiekdamas Polinezijos salas, todėl Europoje šie augalai laikomi adventyviniais (Walsh, Jones, 2013). Pirmieji genties atstovai atvežti į Daniją dar 1935 m., tačiau auginti tik gėlynų apželdinimui, kaip dekoratyvūs augalai (Scally et al., 2001). Nuo 1980 m. Vokietijoje, o vėliau ir kitose Europos šalyse (Airijoje, Anglijoje, Italijoje, Graikijoje, Ispanijoje) pradėti intensyvūs tarprūšinio hibrido *M.* × *giganteus* tyrimai konversijai į energiją. Nustatyta, kad ši aukštaūgė (iki 3,5 m aukščio) žolė geba užauginti itin didelį tinkamos cheminės sudėties biomasės derlių. Tačiau, jos auginimas Europoje turi ir trūkumų: augalai šiauriniuose regionuose prastai žiemoja, nesubrandina gyvybingų sėklų, pasėlių įrengimas šakniastiebiais itin padidina auginimo kaštus ir kt. Tai stabdo platesnius *M.* × *giganteus* taikomuosius tyrimus (Lewandowski et al., 2003). Nepaisant to, pasaulyje, tuo pačiu ir Europoje, susidomėjimas *Miscanthus* genties augalais neblėsta. Vykdomi intensyvūs tyrimai siekiant adaptuoti *M.* × *giganteus* augalus jiems nebūdingose geografinėse platumose (Yan et al., 2012); sukuriami nauji perspektyvūs genotipai (Robson et al., 2013; Van Der Weijde et al., 2017).

Vykdant naujų, energinių augalų paieškas ne tik JAV, bet ir Europoje, ypatingas dėmesys yra skiriamas rykštinei sorai *Panicum virgatum* (Elbersen et al., 2001; Christian et al. 2002; Lewandowski et al., 2003; Alexopoulou et al., 2008; Smeets et al., 2009). Tai daugiametė, C_4 fotosintezės kelio rūšis, kilusi iš Šiaurės Amerikos. Europoje *P. virgatum* daugelį metų buvo auginama tik kaip dekoratyvus augalas (Conert, 1998). Tačiau, nuo 1998 m. įvairiose šalyse (Vokietija, Didžioji Britanija, Nyderlandai, Graikija, Italija) pradėti komp-

leksiniai šios rūšies tyrimai, siekiant įvertinti jos energinį potencialą Europoje, tuo pačiu paspartėjo ir jos auginimo plėtra (Elbersen et al., 2001; Lewandowski et al., 2003). JAV ir Kanadoje rykštinė sora buvo įvardinta modeliniu energiniu augalu (Wright, 2007). Tokį rūšies patrauklumą nulėmė įvairūs veiksniai: biomasės produktyvumas, jos panaudojimo įvairovė, gera adaptacija įvairiomis klimatinėmis ir edafinėmis sąlygomis, ilgaamžiškumas bei ekologinė vertė. Europoje rykštinė sora, skirtingai nei *M.* × *giganteus* augalai, gali subrandinti gyvybingas sėklas. Pasak Y. Iqbal et al. (2015), ši jos savybė yra svarus pranašumas lyginant su kitais introdukuotais C_4 augalais.

Europoje, perspektyviais įvardinti ir kiti adventyvinių rūšių augalai, pvz., iš Šiaurės Amerikos kilę *Helianthus tuberosus, Andropogon gerardii, Spartina pectinata*, tropinių regionų kilmės *Pennisetum purpureum* (Lewandowski, 2013; Stolarski et al., 2014; Laurent et al., 2015). Ištirtas ir daugelio Europos vietinių rūšių augalų energinis potencialas: *Alopecurus pratensis, Arundo donax, Dactylis glomerata, Festuca arundinacea, Lolium* ssp., *Phalaroides arundinacea, Phleum pratense, Phragmites communis, Cyperus longus, Artemisia vulgaris, Bromus inermis*. Minėtų rūšių augalai gali užauginti didelį biomasės kiekį ir pasižymi mažomis auginimo sąnaudomis (Venendaal et al., 1997; Lewandowski et al., 2003; Pociene, Kadziuliene, 2016; Del Giudice et al., 2017).

Apibendrindus įvairius tyrimus literatūroje nurodomos keturios prioritetines energinės žolių rūšys, labiausiai tinkamos auginti Europoje: *Phalaroides arundinacea* yra perspektyviausia auginti Šiaurės Europoje, *Miscanthus* × *giganteus* ir *Panicum virgatum* – Vidurio ir Pietų Europoje, o *Arundo donax* – Viduržemio pajūrio šalyse (Lewandowski et al., 2003).

1.2. Daugiamečių energinių žolių tyrimai Lietuvoje

Lietuvai atsinaujinančių išteklių naudojimas energijos gamybai yra ypač svarbus, kadangi mūsų šalyje nėra pakankamai iškastinių energijos šaltinių. Atsinaujinančių energijos išteklių naudojimas Lietuvoje yra viena iš prioritetinių valstybės strategijų ir siekių, o biomasės auginimas – svarbi šalies energetikos sektoriaus kryptis (Marčiukaitis ir kt., 2016).

Lietuvoje, kaip ir daugelyje užsienio šalių, medienos kuras (malkos, skiedros, pjuvenos) yra pagrindinė biokuro rūšis. Tačiau naujų biomasės paruošimo technologijų dėka, atsirado galimybė biokurą gaminti ir iš įvairių didelės energinės vertės bei didelio biomasės produktyvumo daugiamečių žolinių augalų. Mokslininkai tikisi, kad šalyje įvairių žolinių augalų biomasė galėtų būti perspektyvi alternatyvios energijos rūšis (Jakienė ir kt., 2013). I. S. Šateikis (2006) energinių augalų apžvalgoje teigė, kad mūsų šalyje potencialus energijos kiekis iš aukštaūgių daugiamečių žolių galėtų sudaryti apie 12,6 PJ kietojo kuro per metus.

Energinių želdinių auginimas Lietuvoje yra sąlyginai nauja žemės ūkio sritis. 1997–1999 m. Lietuvos žemdirbystės ir Lietuvos žemės ūkio inžinerijos institutuose atlikti kompleksiniai tyrimai, skirti energinių augalų paieškai, jų auginimo ir naudojimo įvertinimui (Kryževičienė, et al., 2001). Nuo 2004 m. Lietuva kartu su kitomis ES šalimis, taikydama tiesioginių išmokų sistemą skatina biokuro gavybą ir gamybą iš energinių želdinių, auginamų sąlyginai nederlingose ir apleistose žemėse (Bondzinskas, 2014; Bondzinskas, Mačiulytė, 2016). Dabartiniu metu tokių želdinių auginimo teritorinę sklaidą Lietuvoje lemia ekonominiai ir kiti veiksniai, pvz., savivaldybės miškingumas, dirvožemio savybės ir reljefas, dirvožemio melioracinių sistemų būklė ir plėtra bei kt. (Bondzinskas, 2014).

Lietuvoje vykdant energinių žolinių augalų paieškas, nuodugnių tyrimų sulaukė vietinių, savaime šalyje augančių rūšių augalai: *Dactylis glomerata* (Lemežienė ir kt., 2009; Tilvikienė et al., 2009; Tilvikienė et al., 2012 b; Kadžiulienė et al., 2013; Slepetiene et al., 2016), *Festuca arundinacea* (Tilvikiene et al., 2009; Kanapeckas et al., 2011; Tilvikienė et al., 2012 b; Kadžiulienė et al., 2013; Nekrošius et al., 2014), *Phalaroides arundinacea* (Kryževičienė et al., 2006; Tilvikienė et al., 2012 b; Tilvikiene et al., 2016), *Urtica dioica* (Butkutė et al., 2015; Jankauskienė, Gruzdevienė, 2016), *Artemisia vulgaris* (Kryževičienė et al., 2010; Šiaudinis et al., 2012; Kadžiulienė et al., 2013, Jasinskas et al., 2014), *Bromus inermis* ir *Melilotus officinalis* (Kryževičienė et al., 2006). 2008–2011 m. Žuvinto biosferos rezervate įgyvendintas projektas, atkreipė dėmesį, kad aukštaūgės šlapžemių žolės (*Phragmites australis, Typha* sp. ir kt.) taip pat gali būti perdirbtos į biokurą (Simonavičiūtė, 2013). R. Skuodienė et al. (2013) atliko Nemuno deltos natūralių sausminių ir užliejamų pievų bendrijų produktyvumo bei kokybės tyrimus bei palygino jų biomasės energinę vertę.

Pastaraisiais metais, siekiant išplėsti energinių augalų asortimentą Lietuvoje, susidomėta ir nevietinėmis, introdukuotomis daugiamečių žolių rūšimis. Kaip potencialus bioenergijos šaltinis tiriamos *Miscanthus* × *giganteus* (Kryževičienė et al., 2011; Tilvikiene et al., 2012 a; Kadžiulienė et al., 2014), *Silphium perfoliatum* (Šiaudinis et al., 2012, 2015; Jasinskas et al., 2014), *Artemisia dubia, Sida hermaphrodita* (Šiaudinis et al., 2015; Titova, Bakšienė, 2015), *Panicum virgatum* (Butkutė et al., 2013), *Lupinus polyphyllus* (Kryževičienė et al., 2006), *Galega orientalis* (Kryževičienė et al., 2006; Povilaitis et al., 2016; Slepetiene et al., 2016), *Medicago sativa* (Povilaitis et al., 2016; Slepetiene et al., 2016), *Canabis sativa* (Butkutė et al., 2015), *Reynoutria sachalinensis* ir *Polygonum japonicum* (Slepetys et al., 2013).

Lietuvoje, introdukuojant ir aklimatizuojant nevietinių rūšių augalus, susiduriama su nemažai problemų. Pietinių platumų kilmės augalai Lietuvoje blogai žiemoja ir iššąla. Geresniam introdukcijos ir aklimatizacijos efektyvumui pasiekti turi būti išsiaiškintos jų specifinės auginimo ir priežiūros priemonės, nustatytas jų biomasės augimo greitis ir dinamika. Todėl norint gauti didelį introdukuojamų augalų biomasės derlių turi būti parengta auginimo technologija, tinkama jų auginimui vietinėmis klimatinėmis, edafinėmis ir biologinėmis sąlygomis.

Lietuvoje atlikti energinių augalų tyrimai (Lemežienė ir kt., 1998; Kryževičienė et al., 2011) nurodo, kad būtina atsižvelgti į aplinkos veiksnių poveikį augalų produktyvumui ir biomasės kokybei. Daugelis Lietuvoje introdukuotų energinių augalų yra labai reiklūs šilumai, fotoperiodui ir daug didesnį biomasės derlių užaugina šiltesnio klimato šalyse. Pavyzdžiui Pietų Europos šalyse *Miscanthus* × *giganteus* per metus gali užauginti daugiau nei 30 t ha^{1} sausųjų medžiagų derlių, o Lietuvoje ir kitose Šiaurės Europos šalyse – tik apie 10 t ha^{1} (Angelini et al., 2009; Kryževičienė et al., 2011). *Silphium perfoliatum* sausųjų medžiagų derlius, tiek Lietuvoje, tiek piečiau esančiose Europos šalyse yra panašus, apie 11–22 t ha^{1} per metus (Šiaudinis et al., 2012; Gansberger et al., 2015).

Žolinių augalų biomasės produkciją, jos kokybę, o tuo pačiu ir energinį potencialą galima modeliuoti augalų auginimo, nuėmimo, transportavimo, apdorojimo ir laikymo etapuose. V. Tilvikienė et al. (2009) nustatė, kad pjūčių kiekio ir laiko reguliavimas vegetacijos sezono metu gali būti vienas iš būdų optimizuoti biomasės derlių ir kokybę. Parenkant biomasės pjūčių laiką nemažiau svarbu atsižvelgti į augalų brandos trapsnį. Labai svarbu pagrįsti biomasės nuėmimo laiką, nes nuo jo priklauso įvairių elementų (chloro, natrio, kalio) kiekis biomasėje ir pelenuose, pelenų lydymosi temperatūra, degimo dujų sudėtis ir kt. (Šateikis, 2006). J. Titova ir E. Bakšienė (2015) nustatė, kad mineralinių trą-

šų naudojimas turi didelės įtakos ne tik energinių augalų biomasės derlingumui, bet ir jos cheminei sudėčiai. Vis dėlto skirtingose šalyse prognozuoti žolinių augalų biomasės derlių ir jos kokybę yra labai sudėtinga (Arundale et al., 2014; Monti et al., 2015). Tokie tyrimai išlieka aktualūs bei tikslingi.

Apibendrinant įvairius augalinės biomasės auginimo ir naudojimo energetinėms reikmėms tyrimus Lietuvoje, pasigendama detalesnio ir kompleksinio vertinimo. Šiuo metu vis dar trūksta gilesnės analizės, įvertinant daugiamečių žolinių augalų paruošimo, perdirbimo ir naudojimo energetinėms reikmėms technologijas ir techniką bei parenkant energetiškai efektyvius, saugius žmogui ir aplinkai technologinius sprendimus ir priemones mūsų šalyje. Tam įgyvendinti ateityje reikalinga atlikti gilesnius tyrimus.

1.3. Rykštinės soros (*Panicum virgatum* L.) taksonominė ir biologinė charakteristika

Panicoideae pošeimio sistematika filogenetiniu požiūriu yra labai sudėtinga ir iki šiol – neužbaigta. Šis taksonas apjungia daug kosmopolitiškai išplitusių ekonomiškai svarbių rūšių (pvz., *P. miliaceum* ir *P. sumatrense* yra maistinės žemės ūkio kultūros, *P. capillare, P. repens* – agresyvios piktžolės, *P. virgatum* – pašarinis, energinis augalas). Todėl šio taksono sistematinė revizija yra labai aktuali. *Panicoideae* pošeimio rūšys paplitusios subtropinėse ir tropinėse, pusiau sausose taip pat ir pusiau drėgnose srityse. H. Meusel et al. (1965) nurodo, kad pagrindinis *Panicoideae* plėtotės centras – Pietų Amerikos šiaurrytinė dalis. Iš čia šio pošeimio atstovai išplito link Vakarų Afrikos, Malajų, Rytų Australijos. Pastebėtina, kad atlantinėje Šiaurės Amerikoje, *Panicoideae* pošeimio rūšių gausu iki temperatinės zonos. W. Hartley (1961) nuomone, *Panicoideae* skirtingas išplitimas ir raida priklauso ne tik nuo filogenetinių ryšių, bet ir nuo ekologinių priežasčių. Minėtas autorius teigia, kad ekologiniai ryšiai šio pošeimio charakterizavimui turėtų būti tiek pat reikšmingi, kiek ir morfologiniai. Vis dėl to akivaizdu, kad *Panicoideae* yra būdingasis savanų (tropinių varpotynų) taksonas.

Vidurio Europoje *Panicoideae* pošeimis miglinių floroje mažai atstovaujamas. Čia nenurodoma apskritai jokių spontaninių šio pošeimio elementų (Meusel et al., 1965). Tačiau Vidurio Europos floroje išplitusios kai kurios pošeimiui priskiriamos rūšys: *Echinochloa crus-galli, Digitaria ischaemum, Digitaria sanguinalis, Setaria viridis, Setaria verticillata* ir kt. Daugelis jų – žemės ūkio kultūrinių pasėlių piktžolės. Šių taksonų arealai sunkiai apibrėžiami. R. Pilger (1940) artimiausiais jų giminaičiais nurodo subtropinius-tropinius, iš P. Amerikos ar Afrikos kilusius taksonus. Veikiausiai, daugelis tokių vidutinių platumų rūšių atsirado besiformuojant kultūriniams landšaftams. E. Hulten (1962) mano, kad jų arealai gali būti susiję su tropiniu *Panicoideae* įvairovės centru Pietų Amerikoje, o Europinė arealo dalis – akivaizdžiai sinantropinė. Dėl minėtų rūšių kilmės iš pusiau humidinių tropinių-subtropinių sričių, Vidurio Europoje jos daugiau ar mažiau prieraišios okeaninėms sritims su būdingu vasaros sausros periodu. Tik išsamios taksonominės ir chorologinės studijos galėtų padėti nustatyti, kur yra pradinis vystymosi centras šių cirkumpoliarinių ar eurazinių australinių-temperatinių zonų taksonų bei kokios jų istorinio plitimo tendencijos.

Panicum genties taksonų sistematika bei nomenklatūra yra sudėtinga ir nenusistovėjusi. *Panicum* L. (*sensu latu*) gentis yra viena iš didžiausių *Poaceae* šeimoje, vienijanti apie 450 rūšių. Augalijos požiūriu gentis apjungia neotropinius, pantropinius ir vidutinių platumų taksonus; daugiausiai prieraišius subkserofilinėms ir kserofilinėms, taip pat ir

mezofilinėms bei submezofilinėms, rečiau – higrofilinėms sritims (Zuloaga, 1987; Aliscioni et al., 2003).

Įdomu tai, kad *Panicum* genties rūšių augalams būdingi visi trys (C_3, C_4 ir tarpinis C_3/C_4) fotosintezės tipai (Zuloaga et al., 1998). Mokslininkų nuomone, tai liudija apie daugialypę polifiletinę genties kilmę (Aliscioni et al., 2003). Pagal žiedo sandarą, visi *Panicum* (*s. l.*) genties atstovai yra gana panašūs, tačiau kiti morfologiniai, anatominiai, fiziologiniai, citologiniai ir kariologiniai požymiai tiek tarp rūšių, tiek jų viduje smarkiai kinta (Crins, 1991).

Hibridizacija *Panicum* gentyje taip pat turi didelę reikšmę. Genties rūšių bazinis chromosomų skaičius yra n = 8, 9, 10, 11, 15 ir kartotiniai jų deriniai, tarp kurių 9 ir 10 – labiausiai paplitę (Aliscioni et al., 2003). Dalies taksonų hibridinę kilmę rodo tarpiniai tėvinių formų požymiai, taip pat ir poliploidija (Hunt, et al., 2014). Akivaizdu, kad pagal daugelį požymių *Panicum* gentis yra labai polimorfiška.

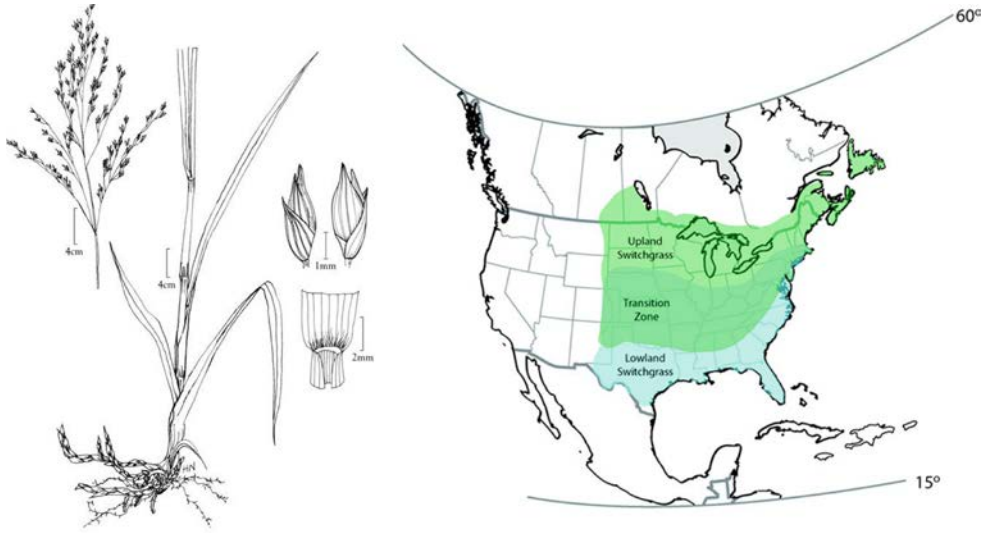
Šiandien *Panicum* (*sensu stricto*) genties filogenetinė sistema remiasi ne tik diagnostiniais morfologiniais-anatominiais, bet ir molekuliniais-genetiniais metodais gauta informacija. Atsižvelgus į tai, daugelio tyrėjų nuomone (Duvall et al., 2001; Giussani et al., 2001; Aliscioni et al., 2003) *Panicum* (*s. s.*) gentis susikirstyta į penkias gimininga monofiletinės kilmės sekcijas, t. y. *Panicum, Virgata, Dichotomiflora, Rudgeana* ir *Urvilleana*. Kartu jos apjungia apie 100 skirtingų rūšių, augančių Amerikoje, Afrikoje, Europoje, Azijoje ir Okeanijoje. Tačiau daugelio Senojo Pasaulio rūšių taksonominė koncepcija šiandien vis dar kelia nemažai mokslinių diskusijų ir lieka neišspręsta (Triplett et al., 2012).

Pagal naujausius taksonomijos duomenis rykštinė sora (*Panicum virgatum* L.) priklauso *Poaceae* šeimai, *Panicoideae* pošeimiui, *Paniceae* tribai, *Panicum* genčiai, *Virgata* sekcijai (Aliscioni et al., 2003; Morrone et al., 2012; Soreng et al., 2015). Tačiau dėl sistematikos rūšies ribose – vieningos nuomonės nėra. Dauguma anksčiau išskirtų *P. virgatum* vidurūšinių taksonų dabar vėl yra jungiami tarpusavyje (Zuloaga et al., 2003; Youngstrom, 2013).

Rykštinė sora (*P. virgatum*) yra C_4 fotosintezės kelio daugiametė rūšis, savaime auganti Šiaurės Amerikoje. Čia jos arealas tęsiasi nuo šiaurinės Meksikos į pietus pasiekdamas 55° šiaurės platumą pietų Kanadoje, o vakarų kryptimi – nuo Šiaurės Amerikos rytinių pakrančių iki Aidaho, Nevados ir Arizonos (1 pav.) (Moser, Vogel, 1995). Rūšis paplitusi borealinėje, temperatinėje, submeridionalinėje ir meridionalinėje zonose ir yra euriokeaninių ir eurikontinentinių sričių, kalvinio – planarinio (lyguminio) pobūdžio grupė.

Tai viena iš rūšių formuojančių Šiaurės Amerikos aukštažoles prerijas (Pound, Clements, 1898), kuriose ji kartu su *Andropogon gerardii, Sorghastrum nutans* ir *Schizachyrium scoparium* rūšimis dažnai yra vyraujantis bendrijų dominantas. Risser et al. (1981) nuomone *P. virgatum* yra prerijų klimaksinių bendrijų rūšis. Tačiau ji auga ir kitokio pobūdžio bendrijose, įsikūrusiose smėlėtuose, sausuose upių šlaituose, užpelkėjusiose, druskingose paežerėse, taip pat ir savanų biomuose (Uchytil, 1993).

Rykštinė sora yra labai polimorfiška rūšis, t. y. evoliucijos eigoje ji įgijo anatominių ir morfologinių bruožų, leidžiančių jai augti ne tik įvairios ekologinės amplitudės augavietėse, bet ir prisitaikyti prie natūralių gaisrų prerijose. Vienas iš šių, gaisrams adaptyvių, požymių yra gebėjimas išauginti stiprius, ilgus ar trumpus šakniastiebius, kurių augimo pobūdis gali būti skirtingas priklausomai nuo ekotipo (Uchytil, 1993).



1 paveikslas. Rykštinė sora (*Panicum virgatum* L.) ir jos natūralaus paplitimo arealas Šiaurės Amerikoje pagal K. M. Ibrahim, P. M. Peterson (2014) ir A. Monti (2012)
Figure 1. Switchgrass (*Panicum virgatum* L.) and its areal of natural distribution in North America by K. M. Ibrahim, P. M. Peterson (2014) and A. Monti (2012)

Rykštinė sora yra kryžmadulkė rūšis, pasižyminti dideliu heterozigotiškumu. Jai būdingi skirtingi ploidiškumo lygiai: nuo 2n=2x=18 iki 2n=12x=108. (Parrish, Fike, 2005). Dažniausios yra tetraploidinės (2n=4x=36) ir oktoploidinės (2n=8x=72) populiacijos (McMillan, 1959; Parrish, Fike, 2005).

Jos stiebai gali siekti 300 cm aukštį, yra tvirti, statūs ar pasidriekę, plaukuotais bambliais ir tvirtais, lygiais ar su matiniu apnašu, žaliais ar rausvai violetiniais tarpubambliais. Lapamakštė – ilgesnė nei apatiniai tarpubambliai, tačiau trumpesnė nei viršutiniai, lygi, plaukuotomis žiotimis ir kraštais; liežuvėlis 2–6 mm dydžio (1 pav.). Lapalakštis yra 10–60 cm ilgio, 2–15 mm pločio, plokščias, status ar atsilošęs, lygus, tačiau dažnai ypač apatinėje pusėje plaukuotas, suapvalintais ar silpnai užaštrintais kraštais ir šiurkščiomis gyslomis. Šluotelė yra 10–55 cm ilgio, 4–20 cm pločio, labai išretėjusi ir plati, glaustomis ar atsilošusiomis žiedyno šakutėms. Varputė yra 2,5–8 mm ilgio ir 1,2–2,5 mm pločio, pailgai elipsiška, nusmailėjusi, plika. Apatinis varpažvynis yra 1,8–3,2 mm ilgio (tai sudaro 2/3–3/4 varputės ilgio), su 5–9 gyslomis, siaurai nusmailėjantis. Viršutinis varpažvynis ir apatinio žiedo žiedažvynis – tokio pat ilgio kaip varputė, su 7–11 gyslų. Viršutinio žiedo žiedažvynis – lygus ir plikas. Apatiniai žiedažvyniai yra 3–3,5 mm ilgio, kiaušiniški, o viršutiniai – 2,3–3 mm ilgio, siaurai kiaušiniški, lygūs, blizgūs. Viršutiniai varpažvyniai apgaubia žiedažvynius tik prie pagrindo (Conert, 1998; Ibrahim, Peterson, 2014).

Rykštinės soros daigų pirminių šaknelių sistema silpna, tačiau išsivysčiusios pagrindinės šaknys gali pasiekti net 3 m gylį (Tischler, Voigt, 1993). Rykštinė sora apibūdinama kaip obligatinis mikotrofas (Wilson, Hartnett, 1998), t. y. ji gali sudaryti mutualistinius sąryšius su mikoriziniais dirvožemio grybais. Mikorizė augalams padeda augti maisto medžiagų ar vandens stokojančiose augavietėse (Parrish, Fike, 2005). Rykštinė sora dirvai nėra reikli. Ji gali augti įvairiuose dirvožemiuose, tačiau yra jautresnė dirvožemio

drėgmei ir labiau prieraiši mezotrofinėms ir higrotrofinėms sritims (Knapp, 1984). Rykštinė sora pakanti dideliam dirvos druskingumui ir rūgštingumui, t. y. gali augti dirvose kurių pH siekia 4,5–7,6 (Uchytil, 1993; Parrish, Fike, 2005).

Mokslininkai, atsižvelgdami į rykštinės soros polimorfiškumą ir gebėjimą augti įvairiose augavietėse nurodo dvi ekotipų – citotipų grupes. Jų charakterizavimui reikšmingas prieraišumas Šiaurės Amerikos aukštumų ir žemumų ekoregionams (Vogel, 2004). Aukštumų ir žemumų ekotipai skiriasi geografiniu paplitimu, ploidiškumo lygiu, anatominiais, morfologiniais ir fenologiniais požymiais (Alexopoulou et al., 2008; Casler, 2012). Pavyzdžiui, aukštumų ekotipai yra žemesni, dažniau pasidriekusios nei stačios kero formos, ilgesnėmis šaknimis, prieraišūs kserotrofinėms augavietėms ir būdingesni šiauresnėse Šiaurės Amerikos platumose. Žemumų ekotipai yra sparčiau augantys, masyvesni ir aukštesni, formuojantys stačius kerus, užauginantys trumpesnes, tačiau storesnes šaknis, augantys drėgnesnėse augavietėse, neatsparūs žemoms temperatūroms, todėl būdingi pietčiau esančiuose Šiaurės Amerikos regionuose (Moser, Vogel, 1995). Aukštumų ekotipo populiacijos dažniausiai yra tetraploidinės (2n=4x=36) ar oktaploidinės (2n=8x=72), o žemumų – tetraploidinės (Vogel, 2004). Yra duomenų, kad egzistuoja ir tarpinės (hibridinės) ekotipų grupės, kurioms būdingas nestabilus ploidiškumo lygmuo (Costich et al., 2010). Tokia vidurūšinė diferenciacija gali būti susijusi su augaviečių ekologinių sąlygų skirtumais dėl klimato, dienos ilgio ir kt. Akivaizdu – didelis genotipinis ir fenotipinis kintamumas suteikia rykštinei sorai adaptyvių bruožų leidžiančių augti įvairiomis klimatinėmis ir edafinėmis sąlygomis.

Svarbiausi aplinkos veiksniai, kurie nulemia rykštinės soros fenologinius procesus yra oro temperatūra ir fotoperiodas. Moksliniuose tyrimuose šie veiksniai dažnai yra analizuojami kartu, nustatant kompleksinį jų poveikį augalų biologiniam ritmui (Linkosalo, Lechowicz, 2006; Cleland et al., 2007; Pudas et al., 2008). Temperatūrų poveikis augalų vegetacijai apibrėžiamas tam tikromis slenkstinėmis oro temperatūromis. Viena iš jų yra augalų biologinio vystymosi minimali temperatūra. Augalas vystosi normaliai, kai aplinkos temperatūra yra aukštesnė už jo vystymosi minimalią temperatūrą, kuri skirtingais vystymosi tarpsniais – nevienoda (Bagdonas, Karalevičienė, 1987). Nustatyta rykštinės soros vystymosi biologinio minimumo temperatūra yra 10 °C, tačiau ji gali varijuoti priklausomai nuo genotipo kilmės (Sanderson, Moore, 1999; Parrish, Fike, 2005). Nemažiau svarbios yra aktyvioji ir efektyvioji temperatūros. Temperatūra, aukštesnė už augalo biologinio vystymosi minimalią temperatūrą, vadinama aktyviąja temperatūra, o efektyvioji temperatūra aiškinama kaip aktyvioji temperatūra, atėmus biologinio vystymosi minimalią temperatūrą (Bagdonas, Karalevičienė, 1987). Pastaroji charakterizuoja augalų poreikį šilumai. Bendrai, aktyviųjų ir efektyviųjų temperatūrų sumos turi ekologinę reikšmę ir parodo augalų bei aplinkos ryšį.

Daugelis autorių nurodo, kad rykštinės soros fenologinis vystymosi ritmas labai priklauso nuo efektyvių temperatūrų sumos vegetacijos metu, o ypač vegetatyvinių struktūrų vystymosi ir augimo metu iki žiedynų pasirodymo tarpsnio (Moser, Vogel, 1995; Parrish, Fike, 2005; Mitchell, Schmer, 2012). Efektyvių temperatūrų sumos nustatymas kiekviename vystymosi tarpsnyje leidžia tiksliau prognozuoti ir modeliuoti rykštinės soros produktyvumą bei pritaikyti tinkamą auginimo technologiją (Van Esbroeck et al., 2003; Casler et al., 2012).

Pavasarį minimali temperatūra inicijuojanti rykštinės soros vegetacijos pradžią yra 10 °C, tačiau ji gali varijuoti (Madakadze et al., 2003). Natūralaus paplitimo areale rykštinė sora vegetaciją pradeda balandžio – gegužės mėnesiais. Pastebima ir fenologinė variacija, priklausoma nuo metų ir geografinės platumos. Pavyzdžiui, Džordžijos valstijoje

rykštinė sora vegetaciją pradeda kovo mėnesį, Centrinėje Oklahomoje – balandžio pradžioje, Rytų Nebraskoje – įpusėjus balandžiui, o Vakarų Kanzase – balandžio pabaigoje (Uchytil, 1993).

Rykštinė sora yra jautri fotoperiodo ilgiui ir priskiriama trumpadienių augalų grupei. Jos žydėjimo pradžia sutampa su trumpesnėmis dienomis ir ilgesnėmis naktimis (Van Esbroeck et al., 2003). Rykštinės soros plaukėti dažniausiai pradeda liepos mėnesį, tačiau piečiau esančiuose kraštuose – rugpjūtyje (Uchytil, 1993). Pastaraisiais metais rykštinės soros tyrimuose daug dėmesio skiriama siekiant nustatyti genotipo kilmės ir aplinkos sąveikos įtaką jos fenologiniam vystymosi ritmui (Casler, 2005; Casler et al., 2007; Jefferson, McCaughey, 2012; Lowry et al., 2014). Mokslininkai nurodo, kad rūšies fenologinė variacija turi geofizinę prigimtį ir yra glaudžiai susijusi su genotipo kilme (geografine platuma). M. D. Casler et al. (2007) Šiaurės Amerikoje atlikti tyrimai parodė, kad rykštinė sora yra mažiau ištverminga žiemą jei yra auginama 5° šiauriau (> 500 km) nuo geografinės kilmės vietos. Tai galima paaiškinti tuo, kad rykštinės soros žydėjimo tarpsnio pradžia sutampa su asimiliacinių medžiagų kaupimosi požeminiuose organuose piku, o šie procesai yra kritiniai kalbant apie jos ištvermingumą žiemą ar sausringais laikotarpiais (Rapacz et al., 2014; Sarath et al., 2014).

Kai kurie autoriai (Van Esbroeck et al., 2003) nurodo, kad rykštinės soros perėjimas iš vegetatyvinių tarpsnių į generatyvinę brandą priklauso ne tik nuo fotoperiodo. Minėti autoriai atliko eksperimentą, kuriame ištyrė dviejų rykštinės soros veislių fenolologinį vystymosi ritmą skirtingos trukmės fotoperiodo sąlygomis. Rezultatai parodė, kad fotoperiodo trukmė nebuvo svarbi žiedynų šluotelių pasirodymo laikui, tačiau turėjo esminę įtaką generatyvinės brandos tarpsnių trukmei. Autoriai siūlo rykštinę sorą vadinti fakultatyvine trumpadiene rūšimi. Vidurio ir Šiaurės Europoje, rykštinės soros genotipai mažai jautrūs fotoperiodo trukmei būtų labai perspektyvūs, todėl jų atranka yra aktuali.

1.4. Rykštinės soros agronominės savybės, auginimo technologijos ir ūkinė reikšmė

Rykštinės soros biomasės naudojimo įvairovė susijusi su rūšies polimorfiškumu. Iki XX a. paskutiniojo ketvirčio rykštinė sora plačiau tyrinėta tik botaninio pobūdžio darbuose, o nuo 1970 m. rūšis sulaukė didesnio susidomėjimo ir žemės ūkio sektoriuje (Parrish, Fike, 2005; Samson, 2007). Rykštinę sorą imta auginti dirvų apsaugai nuo erozijos, ganyklų žolynų įveisimui, ypač pavasarinei ar net birželio mėnesio ganiavai ir pašaro gamybai (Lewandowski et al., 2003; Casler, 2012). Pastebėta, kad ganyklų žolynai kuriuose rykštinė sora sudaro iki 20 % yra geras pašaras galvijams ypač per sausras. Vis dėlto, pašarai iš rykštinės soros, gali paskatinti fotosensibilumo procesus gyvulių organizme (Stegelmeier et al., 2007). To galima išvengti gyvulių racioną papildžius įvairių kitų rūšių žolėmis (Pouli et al., 1992).

Rykštinė sora tinkama ne tik pašarams gaminti, bet ir kietojo kuro, biodujų bei celiuliozinio bioetanolio gamybai (Lewandowski et al., 2003; Parrish, Fike, 2005; Schmer et al., 2008). Jos biomasė ypač tinkama deginimui, nes pasižymi aukšta degimo temperatūra ir nedideliu išsiskiriančių šlakų kiekiu (Mani et al., 2004). Iš hektaro rykštinės soros biomasės galima gauti 3000 – 4000 l etanolio (Varvel et al., 2008). Rykštinės soros celiuliozės, hemiceliuliozės ir lignoceliuliozės struktūra yra sudėtinga, todėl biomasės konversijos į etanolį procesas nėra paprastas (Somerville et al., 2010). Šiuolaikinių inovatyvių metodų taikymas palengvina šiuos procesus. C. Fu et al. (2011) paskelbė, kad pritaikius genų inžineriją etanolio išeigą iš rykštinės soros biomasės galima padidinti 38 %. Moksli-

ninkai mano, kad galima sukurti selekcines linijas, kurios turėtų mažesnį lignino kiekį biomasėje. Tai padidintų cukrų fermentacijos efektyvumą, sumažinantų biokuro gamybos sąnaudas (Xu et al., 2011) ir skatintų spartesnę pramoninę bioetanolio gamybą iš rykštinės soros žaliavos.

D. P. Dunn et al. (1993) akcentuoja rykštinės soros ekologinę vertę. Jos auginimas yra tinkama priemonė prevencijai prieš dirvos eroziją, o stambūs ir aukšti kerai sukuria buveines laukinei faunai. Rykštinė sora turi labai gilią šaknų sistemą, kuri sudaro net iki 80 % visos augalo biomasės (Liebig et al., 2005). Todėl šis augalas gali sukaupti ir gerokai padidinti dirvos organinės anglies rezervą. M. A. Liebig et al. (2005) apskaičiavo, kad rykštinė sora vieno hektaro plote ir vieno metro gylyje kasmet sukaupia apie 2899 kg organinės anglies.

Šiaurės Amerikoje daugelį metų rykštinė sora buvo auginama tik kaip pašarinis augalas (Moore, Buxton, 2000). Šiandien rykštinės soros biomasės naudojimas yra įvairiapusis. Jos biomasė tinkama mulčio ir grybienos biosubstrato gamybai (Samson, 2007). JAV fermerių apklausos duomenimis vertinama rykštinės soros kraiko kokybė. Rykštinė sora tinkama nerentabilių ar užterštų sunkiaisiais metalais žemių fitoremediacijai (Kordas, Tasz, 2012). Pastaruoju metu daug rašoma apie rykštinės soros biomasės naudojimą popieriaus, statybinių kompozitų, bioplastiko bei pluošto, skirto įvairiam techniniam panaudojimui, gamybai (Ververis et al., 2004; Nagarajan et al., 2013; Posen et al., 2017). Įdomu, kad šio augalo pluošto savybės (ilgis, tąsumas) panašios į lino ar medvilnės (Reddy, Yang, 2007). Pasaulyje vertinamos ir rykštinės soros dekoratyviosios savybės. Gėlininkai mėgsta jos ažūrines žiedynų šluoteles, kero aukštį, ilgai nenukrentančius lapus, spalvinę įvairovę. Gėlynams apželdinti sukurtos dekoratyviosios rykštinės soros veislės 'Heavy Metal', 'Rotstrahlbusch', 'Shenandoah', 'Northwind' ir kt. (Trinklein, 2006; Elbersen et al., 2013).

Rykštinė sora yra labai derlinga, ilgaamžė rūšis (Parrish, Fike, 2005). Mokslinėje literatūroje paskelbti duomenys rodo, kad rykštinės soros biomasės derlingumas labai varijuoja priklausomai nuo veislės, metų meteorologinių sąlygų, augimo vietos, tręšimo ir kitų veiksnių (Schmer et al., 2008; Wullschleger et al., 2010). Vidutinis rykštinės soros biomasės derlingumas centrinėse JAV valstijose siekia 10–16 t ha^{-1}, o pietinėse – apie 15–23 t ha^{-1} (Samson et al., 2005). Kadangi rūšis geba prisitaikyti įvairiose platumose (Fike et al., 2006), ja susidomėta ir Pietų Europos šalyse (Elbersen et al., 2001). Čia užauginamas rykštinės soros biomasės derlius svyruoja nuo 0,5 iki 26 t ha^{-1} priklausomai nuo veislės, regiono ir metų (Elbersen et al., 2001). Derlius – kompleksinis požymis, kurį lemia genotipas, aplinkos sąlygos ir taikomos agrotechnikos priemonės. Todėl tikslus modelis rykštinės soros derliui prognozuoti kol kas nėra sukurtas (Sanderson et al., 1996; Parrish, Fike, 2005). JAV mokslininkai pastebi, kad rykštinės soros biomasės derlius didėja nuo šiaurinių platumų pietų link (McLaughlin et al., 1999; Samson et al., 2005; Parrish, Fike, 2005). Tai susiję su rykštinės soros fiziologija: pietesnėse platumose, išnaudodami ilgesnį vegetacijos sezoną ir aukštesnę oro temperatūrą, augalai užauga daug didesni nei šiauriau augantys. Šiaurės Amerikoje skirtingas rykštinės soros biomasės derlius nustatytas ir rytų – vakarų ilgumų kryptimis. Rytinėse valstijose augalai yra derlingesni, tikėtina dėl didesnio kritulių kiekio būdingo šiai žemyno sričiai (Parrish, Fike, 2005).

Literatūroje prieš pusę amžiaus skelbti rykštinės soros biomasės derlingumo duomenys buvo gerokai mažesni nei šiandiena, todėl akivaizdu šis ūkiškai svarbus požymis įvairiais selekcijos ir agrotechniniais metodais buvo labai pagerintas (Parrish, Fike, 2005). Pirmosios rykštinės soros veislės labiau atspindėjo skirtingų vietovių laukines populiacijas, nei selekcijos metodais sukurtą medžiagą. Būtent dviejų ekotipų fenotipiniu skirtin-

gumu buvo pagrįsta rykštinės soros selekcijos pradžia. Prieš penkiasdešimt metų JAV mokslo darbuose skelbiami rykštinės soros biomasės vidutiniai derliai retai tesiekė 2 t ha^{-1} per metus (Parrish, Fike, 2005). Vėliau, pritaikius tradicinius (skirtingų ekotipų kryžmadulka, masinė populiacijų atranka) ir modernius genetinius metodus, buvo sukurtos naujos, perspektyvios, didelio produktyvumo veislės (Burns et al., 2008; Casler, 2012, Vogel et al., 2014). K. P. Vogel ir R. B. Mitchell (2008) nurodo, kad labai perspektyvūs yra skirtingų ekotipų hibridai, nes jie pasižymi 30–50 % didesniu derliumi nei tėvinės formos. G. S. Chuck et al. (2011) nuomone, pritaikius molekulinius genetinius metodus galima slopinti augalų žydėjimą ir taip dar labiau padidinti biomasės derlių bei baltymų kiekį rykštinės soros biomasėje. Šiandien rykštinės soros biomasės derlius gali viršyti 30 t ha^{-1} per metus. Akivaizdu, rykštinę sorą pripažinus vienu iš perspektyviausių energinių augalų, selekcijos dėka buvo labai greitai pagerinti jos biomasės derliaus rodikliai (Casler, 2012).

Pastaraisiais metais JAV siekiama sukurti veisles pasižyminčias ne tik dideliu biomasės derliumi, bet ir plastiškas įvairiose gamtinėse zonose. Todėl itin aktualūs tyrimai, kuriuose atrenkami konkrečiai vietovei tinkamiausi rykštinės soros genetiniai ištekliai (Elbersen et al., 2001; Casler et al., 2007; Jefferson, McCaughey, 2012). Paskutinį dvidešimtmetį išsamūs kompleksiniai rykštinės soros tyrimai atliekami ir ES šalyse (Elbersen et al., 2001; Christian et al., 2002; Lewandowski et al., 2003; Alexopoulou et al., 2008; Smeets et al., 2009; Kordas et al., 2012). Šiandien rykštinė sora yra introdukuota ir auginama Vidužemio jūros regiono, Pietų ir jūrinio klimato Vakarų Europoje, t. y. šalyse, kurios yra nuo 40° 09' (Graikija) iki 52° 38' (Nyderlandai) šiaurės platumos (Elbersen, 2001). Pietų Europos šalyse rykštinė sora yra labai produktyvi. A. Monti et al. (2015) nustatė, kad Italijoje sėjos metų pasėliuose rudenį rykštinės soros biomasės sausųjų medžiagų derlius yra apie 6 – 7 t ha^{-1}, o antrais ir trečiais derliaus metais – jis siekia apie 20 t ha^{-1}. Įdomu tai, kad žiemą nupjautų augalų biomasės derlius patikimai lenkė rudeninį derlių. Autoriai mano, kad Vidužemio jūros regiono šalyse rykštinės soros vegetacijos trukmė yra ilgesnė. Augalai gali auginti biomasę iki vėlyvo rudens. Todėl didesnis rykštinės soros derlius šiame Europos regione gaunamas augalus nupjovus žiemą. Moksliniai tyrimai nurodo, kad rykštinė sora gali būti auginama ir šiauriau esančiose Europos šalyse (Barney, Di Tomaso, 2011). Tačiau duomenų apie rūšies laukinių populiacijų ar kultūrinių veislių adaptaciją Europos nemoralinės zonos šalyse vis dar trūksta (Robbins et al., 2012).

Rykštinės soros biomasės derlius ir cheminė sudėtis labai priklauso nuo auginimo sąlygų bei taikomų auginimo technologijų. Tinkamai įrengus rykštinės soros pasėlius, jie gali būti naudojami 8–10 metų nereikalaujant papildomo žemės dirbimo ir tręšimo (Casler, 2012). Rykštinę sorą galima auginti įvairiose smėlio, molio ar priemolio dirvose. Geriausiai ji auga derlingose, drenuotose dirvose, tačiau gali augti ir akmenuotuose bei užpelkėjusiuose dirvožemiuose. Rykštinė sora yra pakanti sausrai, užmirkimui bei atspari įvairiems biotiniams stresoriams. Todėl ją auginant galima išvengti cheminių augalų apsaugos produktų bei trąšų naudojimo (Parrish, Fike, 2005). Be to, derliui nuimti tinka įprasta žemės ūkio technika, todėl tam nereikia papildomų brangių investicijų (Vogel, Jung, 2000; Lewandowski et al., 2003).

Rykštinės soros pasėlių įrengimui gali būti naudojama įvairi dauginamoji medžiaga: sėklos, ūgliai ar šakniastiebiai. Šios rūšies sėkloms sudygti reikalinga 25 °C aplinkos temperatūra (Hanson, Johnson, 2005), o dirvos temperatūra turi būti ne mažesnė nei 20 °C (Hsu et al., 1985). Rykštinės soros sėkloms būdingas ilgai trunkantis natūralus ramybės periodas, todėl pasėjus šviežią pirmų metų sėklą pasėlių sudygimas gali būti pras-

tas (Zarnstorff et al., 1994; Duclos et al., 2013). Mokslininkai nurodo įvairius sėklų apdorojimo būdus padedančius suaktyvinti biocheminius procesus sėkloje ir sužadinančius jų dygimą. Skarifikacija sėklų daigumą padidina net 73 % (Zarnstorff et al., 1994). Veiksminga ir sėklų stratifikacija drėgname substrate, todėl kai kurie autoriai rekomenduoja rykštinės soros sėklas sėti ankstyvą pavasarį (Shen et al., 2001). M. E. Zarnstorff et al. (1994) nurodo, kad ne tik sėklos amžius, bet ir laikymo sąlygos yra reikšmingos jų daigumui.

Rekomenduojamas rykštinės soros sėjos laikas yra panašus kaip kukurūzų (*Zea mays* L.) (Sanderson et al., 2012). D. Wolf ir D. Fiske (2009) nurodo, kad birželio mėnesio pradžia yra pats tinkamiausias laikas šio augalo sėjai, tačiau ankstyvesnė sėja – taip pat galima. Minėtų autorių nuomone optimaliausias sėklų įterpimo į dirvą gylis yra 0,6–1,3 cm. Pavėluota sėja gali lemti prastesnį daigų vystymąsi ir pasėlių žūtį žiemos metu. Rykštinės soros pasėlio optimaliam formavimuisi svarbu parinkti ir tinkamus atstumus tarp sėjamųjų eilučių. Tai gali nulemti augalų stiebų skaičių, lapų plotą, biomasės sausųjų medžiagų derlių ploto vienete (Sanderson, Reed, 2000).

Sėjos metais pasėlio augimas labai priklauso nuo dirvos drėgnumo, derlingumo ir piktžolėtumo. Rykštinės soros daigų augimas yra lėtas, jie turi silpną pirmųjų šaknelių sistemą ir yra jautrūs piktžolių stelbimui. Todėl prieš sėją būtina tinkamai ir kruopščiai paruošti dirvą (Parrish, Fike, 2005; Schmer et al., 2006; Wolf, Fiske, 2009). Rykštinės soros pirmųjų metų pasėlių piktžolėtumo kontrolės sąnaudos gali siekti net ketvirtį visų sėjos lėšų (De La Torre Ugarte et al., 2003). Be rudeninio dirvos arimo ir pavasarinio kultivavimo, piktžolėtumui mažinti galima taikyti ir pupinių augalų įsėjimą. Pasėliuose su pupinių augalų įsėliu ne tik mažiau plinta piktžolės (Miesel et al., 2012), bet ir padidėja augalinių liekanų kiekis, efektyviau naudojamas vanduo ir maisto medžiagos, mažėja N reikšmė rykštinės soros derlingumui (Xu et al., 2008). Todėl biomasės derlius tokiame pasėlyje yra stabilesnis lyginant su vienarūšiu pasėliu.

Žemės ūkio agrofitocenozėse nustatyti rykštinės soros augimo strategiją nėra lengva. Sėjos metų pasėlyje, ji nesugeba konkuruoti su piktžolėmis (Mitchell, Britton, 2000; Elbersen et al., 2001; Parrish, Fike, 2005). Tačiau vėliau, rykštinės soros augalams pasiekus biologinę brandą, jos konkurencinis pajėgumas išauga. Yra žinoma, kad savaiminio paplitimo areale, natūraliose augalų bendrijose rykštinė sora dažnai yra fitocenozių formuotoja (Anderson, 2006; Kindscher et al., 2010). Tai stiprus violentas. Violentai – konkurenciškai pajėgiausi augalai, turintys ryškių edifikatorių savybių (Naujalis, 1992). Deja, rykštinės soros pasėlio formavimuisi ir vystymuisi piktžolių konkurencinio fono įtaka bei stelbiamasis poveikis yra labai mažai tirti. Koks šios rūšies konkurencingumas su Europos vietinių rūšių piktžolėmis – lieka neatsakyta.

Norint gauti didelį tinkamos kokybės rykštinės soros biomasės derlių būtina nustatyti optimalų pjūčių skaičių ir jų laiką vegetacijos sezono metu. Kietajam kurui gaminti rekomenduojama rykštinės soros biomasės derlių nuimti vieną kartą per sezoną, pjaunant augalus vėlyvą rudenį ar net žiemą. (Parrish, Fike, 2005). Vėlyva rudeninė pjūtis leidžia augalams pergabenti maisto ir kitas biologiškai aktyvias medžiagas į šaknyną, taip pasiruošiant žiemos periodui (Adler et al., 2006). Tačiau vėlinant pjūtį, biomasės produkcija gaunama mažesnė (Sanderson et al., 1999). Biomasę nupjovus vasaros pabaigoje ar rudens pradžioje nors ir gaunamas didesnis derlius, tačiau biomasė būna drėgnesnė, joje nustatomi didesni K, P, N, Si kiekiai (Ogden et al., 2010). Naudojant tokią biomasę deginimui susidaro daug pelenų, o mineralai gali sukelti šlakų, teršiančių degimo katilus, susidarymą. Negana to, teršiama ir aplinka (Parrish, Fike, 2005). Biodujų gamybai – pranašesnė dviejų pjūčių žolės biomasė, nes ši žaliava yra turtingesnė vandenyje tirpių cukrų,

turi mikrobų veiklai palankesnį anglies ir azoto santykį, yra mažiau lignifikuota (Rodriguez et al., 2017). Pjaunant rykštinę sorą pavasarį ir vasarą labai svarbu atsižvelgti į augalų vystymosi tarpsnį pjūties metu bei vengti sausrų periodo (Trócsányi et al., 2009; Massé et al., 2010). Tampa aišku, kad pjūčių režimo reguliavimas vegetacijos metu yra vienas iš būdų gauti geros kokybės optimalų biomasės derlių. Mokslininkai sutaria, kad kiekvienu atveju, priklausomai nuo auginimo vietos, meteorologinių sąlygų, pasėlio amžiaus ir kt., reikalinga taikyti skirtingas agrotechnines priemones bei būdus, todėl vieningo derliaus formavimo modelio nėra.

Įvairių autorių nuomone rinkos kaina už vieną toną rykštinės soros sausos biomasės galėtų siekti apie 55 € Pietų Europoje, o JAV – nuo 64 iki 73 € (Monti et al., 2007). E. M. W. Smeets et al. (2009) pagal 2004 m. ekonominės situacijos skaičiavimus konstatavo, kad rykštinės soros auginimo Lietuvoje (įskaitant saugojimo ir transportavimo apie 100 km spinduliu) sąnaudos vienai tonai sausos biomasės prilygtų 43–64 € arba 2,4–3,6 € vienam GJ HHV, o iki 2030 m. prognozuojamos auginimo sąnaudos, autorių nuomone, turėtų išlikti taip pat patrauklios.

1.5. Rykštinės soros biomasės skirtos biokurui kokybės reikalavimai

Šiandien, rykštinė sora vertinama kaip įvairios rūšies biokuro žaliava. Rykštinės soros biomasė gali būti naudojama metanui, bioetanoliui ir kietajam kurui gaminti priklausomai nuo to ar konversijos į energiją sistemos naudoja biologinius, biocheminius ar termocheminius procesus (Adler et al., 2006; Sanderson et al., 2007).

Šiandiena pripažįstama, kad rykštinė sora, kaip ir kiti nemaistinės paskirties lignoceliuliozinė augalai, yra perspektyviausia žaliava perdirbimui į antrosios kartos biodegalus. Kadangi angliavandenių kiekis yra tiesiogiai proporcingas etanolio išeigai, jų ištyrimas biomasėje yra labai svarbus (Sluiter et al., 2010). Priklausomai nuo biomasės apdorojimo ir hidrolizės efektyvumo, etanolio išeiga iš heksozių ir pentozių (celiuliozės ir hemiceliuliozės monomerų) svyruoja nuo 72 % iki 92 % didžiausios teorinės išeigos (Keshwani, Cheng, 2009). Teorinis bioetanolio derlius iš rykštinės soros biomasės svyruoja nuo 2000–4000 l ha^{-1} (Schmer et al., 2008) iki 5000–6000 l ha^{-1} priklausomai nuo biomasės derliaus (Parrish, Fike, 2005).

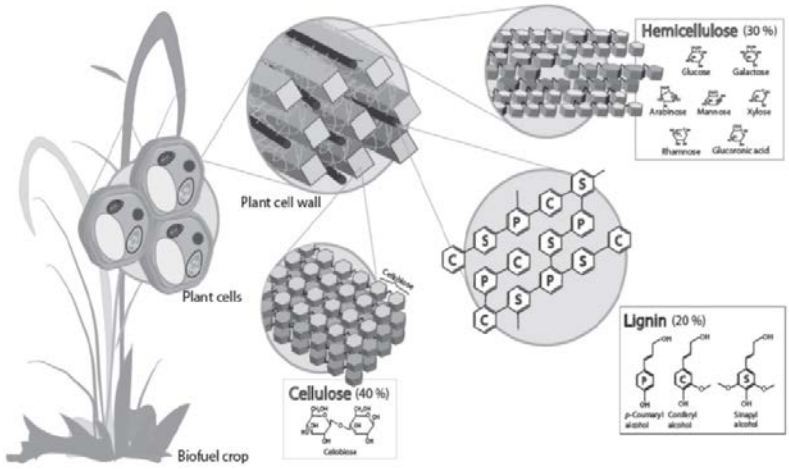
Norint gauti didelę metano išeigą, augalinė biomasė turi turėti optimalų anglies ir azoto santykį bei pasižymėti atitinkama chemine sudėtimi: turėti mažai lignino, tačiau daug lengvai skaidomų nestruktūrinių angliavandenių ir tirpiųjų ląstelės komponentų (Amon et al., 2007; Seppälä et al., 2009). Literatūros duomenimis optimalus C ir N santykis biodujų gamybai skirtoje žaliavoje yra nuo 20:1 iki 30:1 (Klimiuk et al., 2010). Nuo to priklauso anaerobinio proceso optimizavimas, biologinis biomasės skaidomumas ir metano išeiga (Amon et al., 2007).

Vertinant rykštinę sorą kaip tiesioginio deginimo žaliavą, be biomasėje sukauptos anglies, pagrindinio energijos šaltinio, svarbi yra jos drėgmė, sunkiųjų metalų koncentracija, peleningumas ir pelenų sudėtis, bei N, S, Cl kiekiai, kurie įvairių junginių pavidalu (sieros ir azoto oksidai, chloridai) gali teršti aplinką. (Dahl, Obernberger, 2004).

Anot įvairių literatūros šaltinių pagrindiniai biomasės kokybiniai parametrai lemiantys jos energinį potencialą yra lignoceliuliozė, biomasės drėgnis, peleningumas ir mineralinių elementų koncentracija (McKendry, 2002; Gupta, Demirbas, 2010).

Lignoceliuliozė. Rykštinės soros, kaip ir kitų lignoceliuliozinių augalų, didžiąją biomasės dalį sudaro ląstelių sienelės, o šios yra sudarytos iš celiuliozės, hemiceliuliozės ir lignino polimerų (2 pav.). Šių komponentų santykis ir proporcija biomasėje vaidina

svarbų vaidmenį optimizuojant bioenerginės žaliavos apdorojimo technologijas (Demirbaş, 2001; Sanderson et al., 2007). Celiuliozės, hemiceliuliozės ir lignino kiekis bei jų pasiskirstymas augale priklauso nuo augalo rūšies, ląstelių tipo ir augalo brandos. Celiuliozės koncentracija žolinių augalų ląstelių sienelėse įprastai būna didžiausia ir siekia 25 – 50 %, hemiceliuliozė sudaro apie 15 – 30 %, o ligninas 15 – 25 % (Vermerris, 2008).



2 paveikslas. Pagrindiniai augalų biomasės biopolimerai (celiuliozė, hemiceliuliozė ir ligninas). Kvadratuose pavaizduota polimerų monomerinių vienetų struktūra bei jų procentinė dalis medienoje. Pagal V. Agbor et al. (2014)

Figure 2. Plant biomass polymers (cellulose, hemicelluloses and lignin). The source of polymers inter-relatedness in the heteromatrix and the monomeric units of the polymers from a woody plant showing approximate percentages (Agbor et al., 2014)

Celiuliozė yra gamtinis polisacharidas, sudarytas iš gliukozės monomerų, sujungtų glikozidiniais ryšiais. Šio polisacharido molekulės yra linijinės struktūros, išsidėsčiusios viena greta kitos, o grandinės tarpusavyje sujungtos silpnais vandeniliniais ryšiais. Dėl didelio šių ryšių kiekio celiuliozė yra mechaniškai tvirta ir visiškai netirpi vandenyje, tačiau – hidrofiliška, t. y. brinkstanti vandenyje (McKendry, 2002; Gupta, Demirbas, 2010). Pramonėje, celiuliozės skaidomumui suaktyvinti naudojamas mechaninis žaliavos apdirbimas, terminės, cheminės arba biologinės priemonės (Taherzadeh, Karimi, 2008).

Kitas polisacharidas kartu su celiulioze ir pektinu sudarantis augalinių ląstelių sieneles yra hemiceliuliozė. Priešingai nei celiuliozė, hemiceliuliozės polisacharidai yra heterogeniškai šakotos makromolekulės, sudarytos iš pentozių, heksozių bei urono rūgščių. Palyginus su celiulioze, hemiceliuliozė yra lengviau skaidoma mikroorganizmų (McKendry, 2002; Gupta, Demirbas, 2010). Kartu celiuliozė ir hemiceliuliozė sudaro vadinamąją holoceliuliozę (Gupta, Demirbas, 2010). Mikrobiologinių ar cheminių procesų dėka, celiuliozė ir hemiceliuliozė gali būti konvertuojamos į cukrus, kurie reikalingi etanolio arba butanolio gamyboje (McKendry, 2002; Chandra et al., 2007). Todėl biomasės žaliava turtinga šių polisacharidų duoda didesnę energijos išeigą.

Ligninas yra natūralus mišrus polimeras, beveik visai neskaidomas anaerobinių bakterijų. Didelė jo koncentracija biomasėje mažina celiuliozės ir hemiceliuliozės skaidymo efektyvumą, todėl slopinamas biodujų gamybos procesas (Dien et al., 2006; Casler et al., 2008). Tačiau ligninas yra ypač vertingas komponentas tiesioginiam deginimui skirtoje žaliavoje, nes palyginus su kitais struktūriniais lignoceliuliozės komponentais yra mažiau oksiduotas, tad pasižymi didesne degimo energija (Demirbas, 2003). Lignino energinė vertė prilygsta akmens angliai, o šilumingumas siekia apie 25–26 MJ kg^{-1} biomasės (Vermerris, 2008). P. McKendry (2002) nurodo, kad C_4 žolių šilumingumas yra labai panašus į medienos, pvz., rykštinės soros – 17,4 MJ kg^{-1}, drambliažolės – 18,5 MJ kg^{-1}, tuopų – 18,5 MJ kg^{-1}; gluosnių – 20 MJ kg^{-1}.

Biomasės drėgnis. Biomasės drėgnis gali būti dvejopos formos. Augalų viduląstelinis bei tarpląstelinis drėgnis yra nulemtas jame vykstančių fiziologinių procesų, fiziologinės brandos ir t. t. Biomasės išorinis drėgnis – susijęs su aplinkos oro sąlygomis derliaus nuėmimo metu. Fermentuojant biomasę į etanolį palankesnė yra didelio drėgnumo žaliava. Tačiau, termocheminiuose procesuose reikalinga mažo drėgnio (≤ 50 %) žaliava. Drėgnos biomasės peleningumas yra didesnis, be to joje gali būti aukštesnė šarminių metalų koncentracija (McKendry, 2002). Tai lemia mažesnę grynosios energijos išeigą degimo metu.

Plonastiebių žolinių augalų, tokių kaip rykštinė sora, biomasės drėgnis vegetacijos metu kinta nuo 50 % – ankstyvose pjūtyse iki 25 % – vėlyvose pjūtyse, o išdžiovinus siekia 13 – 15 %. Palyginimui svarbu paminėti, kad nupjautos medienos drėgnis būna apie 45 – 50 % (McLaughlin et al., 1996; Kumar, Sokhansanj, 2007). Įprastai, stiebai turi mažiausiai drėgmės, o šaknyse ir lapuose jos yra daugiau (Gupta, Demirbas, 2010). Rykštinės soros 13 – 15 % drėgnumo biomasės šilumingumas yra apie 18,0 GJ t^{-1} sausos medžiagos (McLaughlin et al., 1996). Didesnis biomasės drėgnis derliaus nuėmimo metu padidina jos transportavimo ir tvarkymo išlaidas. Tai neigiamai veikia bendrą energinį balansą. Norint sumažinti žolinės biomasės užsidegimo pavojų jos sandėliavimo metu, vandens kiekis joje turėtų būti mažesnis nei 230 g kg^{-1} žalios biomasės (Lewandowski, Kicherer, 1997).

Pelenai. Viena iš problemų žolinius augalus naudojant kietajam biokurui yra tai, kad jų biomasės degimo metu susidaro daug pelenų, kurių sudėtis kelia gausybę praktinių problemų (Ogden et al., 2010). Degimo proceso metu 1 % didesnis biomasės peleningumas sumažina energijos vertę apie 0,2 MJ kg^{-1} (Cassida et al., 2005). T. R. Miles et al. (1993) nurodo, kad netinkama pelenų cheminė sudėtis gali sukelti įvairių problemų termodinaminio proceso metu. Didelis pelenų kiekis bei didelė koncentracija juose esančių nepageidaujamų mineralų, sudaro sąlygas susidaryti šlakams, nuodegoms ir apnašoms ant degimo katilų vidaus paviršių, o tai mažina jų naudingumo koeficientą ir padidina priežiūros išlaidas (Baxter et al., 1998).

Mineraliniai biomasės komponentai. Mineralinė biomasės sudėtis yra ypač svarbi biomasės termocheminės konversijos procesuose. Tiesioginio degimo sistemose mineralai dažnai suformuoja druskų lydinius ir silikatus, kurie sukelia katilų koroziją ir užsiteršimą, šlakų susidarymą (Adler et al., 2006; Obernberger et al., 2006; Szemmelveisz et al., 2009).

Nagrinėjant žolių biomasės panaudojimą energijai gaminti, svarbu atkreipti dėmesį į junginius, kurių sudėtyje yra azoto (N), chloro (Cl) ir sieros (S). Nedideli jų kiekiai biomasėje, skirtoje deginimui, yra neišvengiami ir problemos nesudaro, tačiau didesnė jų koncentracija – NOx, SOx ir HCl pavidalu sukelia nuosėdų susidarymą ant kūryklos paviršių, be to sudaro dalį emisijų į aplinką ir ją teršia (Pedišius ir kt., 2016). Siekiant iš-

vengti šių problemų mažiausias N kiekis biomasėje turi būti ne didesnis nei 10 g kg^{-1} sauso svorio (Lewandowski, Kicherer, 1997). Tam pasiekti siūloma vėlinti pjūties laiką. P. R. Adler et al. (2006) atlikti tyrimai parodė, kad vėlinant pjūtį ar net pjaunant augalus po žiemos ne tik sumažinamas biomasės drėgnis, bet ir išvengiama didelės koncentracijos nepageidaujamų biomasės cheminės sudėties komponentų (Cl, K). Biomasėje Cl ir K koncentracijų sumažėjimas yra labai svarbus, nes abu šie elementai yra susiję su korozijos procesais krosnyse, mažina pelenų lydymosi tašką, sudaro šlakus, nuodegas ir apnašas. Sumažėję mineralinių elementų kiekiai vėlyvos pjūties biomasėje susiję su fiziologine augalo branda bei aplinkos oro sąlygomis, kurios padeda pašalinti nepageidaujamus elementus iš biomasės. Rudenį, augalams senstant, daugelis mineralų iš vienmečių audinių (lapų, stiebų, žiedynų) natūraliai yra pernešami į daugiamečius audinius, t. y. krūmijimosi mazgus ir šaknis (Kludze et al., 2011).

Rykštinės soros energinio potencialo tyrimuose turėtų būti vertinama ne tik visos antžeminės biomasės kokybė, bet ir atskirų biomasės struktūrinių komponentų kokybinė vertė. A. Monti et al. (2008) tyrimai parodė, kad žolių biomasės kokybė yra susijusi su augalo morfologine frakcija, pvz., lapai pasižymi gerokai didesniu pelenų ir mineralinių medžiagų kiekiu nei stiebai ir žiedynai. Žolėms bręstant didėja jų biomasės kiekis, kinta lapų, stiebų santykis bei keičiasi jų cheminė sudėtis. Taigi biomasės kokybė gali priklausyti nuo augalo išsivystymo tarpsnio (Butkutė, Paplauskienė, 2004) ir jo amžiaus (Kanapeckas et al., 2011; Butkutė et al., 2013a; Butkutė et al., 2013b). H. M. El-Nashaar et al. (2009) nustatė esminę augavietės įtaką rykštinės soros biomasės mineralinių medžiagų pasiskirstymui. Akivaizdu, mineralinių, kaip ir organinių, komponentų kaita rykštinės soros biomasėje priklauso nuo įvairiausių veiksnių, t. y. žolių tvarkymo technologijos, pjūties laiko, genotipo, augavietės aplinkos veiksnių ir kt. (Elbersen et al., 2001; Christian et al., 2002; Butkutė, Paplauskienė, 2006; Adler et al., 2006; El-Nashaar et al., 2009; Butkutė et al., 2013a; Butkutė et al., 2013b; Lindsey et al., 2013).

2. TYRIMŲ OBJEKTAS, SĄLYGOS IR METODAI

2.1. Tyrimų objektas

Tyrimų objektas – rykštinė sora (*Panicum virgatum* L.).

Tyrimo medžiagą sudarė rykštinės soros laukinės populiacijos, selekcinės linijos ir veislės, gautos iš JAV Žemės ūkio departamento Augalų genetinių išteklių apsaugos tarnybos (USDA) bei privačių sėklų kompanijų. Iš viso gauti 76 rykštinės soros sėklų pavyzdžiai. Didžiąją dalį šios medžiagos, t. y. 71 % sudarė laukinės populiacijos, 25 % – veislės ir 4 % – selekcinės linijos. Pagal geografinę kilmę, daugiausia tirtų populiacijų buvo iš Šiaurės Dakotos (3 pav.). Detalesnė informacija apie populiacijas pateikta 1 priede.

3 paveikslas. Tirtų rykštinės soros populiacijų geografinė kilmė ir kiekis

Figure 3. The amount of switchgrass populations used in investigations and their geographic origin

2.2. Tyrimų bendrosios sąlygos, laikas ir vieta

Tyrimų laikas ir vieta. Rykštinės soros tyrimai atlikti Lietuvos agrarinių ir miškų mokslų centro filialo Žemdirbystės institute (LAMMC ŽI). Augalų struktūrinių elementų analizė atlikta LAMMC ŽI Žolių selekcijos skyriaus laboratorijoje 2013–2016 m.; biomasės kokybinė sudėtis – LAMMC ŽI Cheminių tyrimų laboratorijoje 2013–2016 m.; augalų ploidiškumo nustatymas – LAMMC ŽI Genetikos ir fiziologijos laboratorijoje 2013–2014 m. Dirvožemio agrocheminiai rodikliai nustatyti LAMMC filialo ŽI Cheminių tyrimų laboratorijoje ir LAMMC Agrocheminių tyrimų laboratorijoje 2014 ir 2016 metais.

Genetinių kolekcijų ir lauko eksperimento įrengimas. 2012 ir 2014 metais LAMMC ŽI Žolių selekcijos skyriaus sėjomainos laukuose buvo pasodintos dvi rykštinės soros genetinės lauko kolekcijos ir 2014 m. įrengtas vienas lauko eksperimentas (4 pav.).

A B C

4 paveikslas. A – 2012 m. sodinimo rykštinės soros genetinė lauko kolekcija, B – 2014 m. sodinimo rykštinės soros genetinė lauko kolekcija, C – 2014 m. sėjos lauko eksperimentas. Nuotraukos autorės

Figure 4. A – genetical collection of switchgrass planted in 2012, B – genetical collection of switchgrass planted in 2014, C – field experiment sown in 2014. Photography created by the author

Pirmoji rykštinės soros genetinė kolekcija (toliau – I kolekcija) įrengta 2012 m. Joje iš viso pasodintos 36 laukinės kilmės populiacijos. I kolekcijoje buvo atliekami rykštinės soros populiacijų agrobiologinių požymių vertinimai (nurodyta 2.3.1. poskyryje) bei antžeminės biomasės derliaus tyrimai imituojant augalų naudojimą gamybinėse sąlygose: biodujoms – 2 pjūtys, biokurui ir bioetanoliui – 1 pjūtis. Pirmame variante žolė pjauta 2 kartus (pirma pjūtis augalų plaukėjimo pradžioje, o antra – atžėlus atolui), antrame variante žolė pjauta tik kartą per sezoną (sėkloms subrendus).

Antroji rykštinės soros genetinė kolekcija (toliau – II kolekcija) įrengta 2014 m, kurioje iš viso pasodintos 68 skirtingos kilmės rykštinės soros populiacijos (laukinės populiacijos, selekciniai numeriai, veislės). Jų tarpe 29 populiacijos sutapo su populiacijomis I kolekcijoje. Siekiant įvertinti ir atrinkti vertingiausias populiacijas II kolekcijoje buvo atlikti jų agrobiologinių požymių (nurodyta 2.3.1. poskyryje), antžeminės biomasės kiekybinių ir kokybinių požymių vertinimai. II kolekcijoje augalai buvo pjaunami tik vieną kartą sėklų brandos tarpsnyje. Pirmaisiais metais po kolekcijos įrengimo buvo tiriama visa turima genetinė medžiaga, o kitais – atrinkta pagal žiemojimo, derlingumo ir agrobiologinius požymius (nurodyta 2.3.1. poskyryje).

Lauko eksperimentas. 2014 m. buvo įrengtas lauko eksperimentas, kuriame tirtos trys rykštinės soros veislės ('Dacotah', 'Cave in Rock', 'Forestburg') bei viena hibridinė populiacija. Veislės tyrimui pasirinktos pagal rykštinės soros auginimo rekomendacijas Europos vidutinio klimato zonos šalyse (Elbersen et al., 2001). Hibridinė rykštinės soros populiacija gauta iš Lietuvoje užaugintų ir laisvai susikryžminusių laukinių populiacijų kilusių iš Šiaurės Dakotos. Lauko eksperimente buvo atliekami skirtingų populiacijų (3 veislių ir hibridinės populiacijos) antžeminės biomasės derliaus tyrimai imituojant augalų naudojimą gamybinėse sąlygose:

1. Biodujoms – augalai pjauti dviejų pjūčių režimu. Pirma pjūtis atlikta augalų plaukėjimo pradžioje BBCH 5 (194 metų dieną), bei žydint BBCH 6 (2015 m. – 216 dieną, 2016 m. – 221 dieną). Antra pjūtis atlikta atžėlus atolui BBCH 4 (2015 m. – 279 dieną, 2016 m. – 277 dieną). Augalų nupjautų žydėjimo tarpsnyje atolas užaugo menkai arba visai neataugo, todėl tolimesniuose tyrimuose jį analizuoti atsisakyta.
2. Biokurui ir bioetanoliui – augalai pjauti tik kartą sėklų brandos tarpsnyje ar augalams senėjant BBCH 8 – 9 (2015 m. 279 dieną, 2016 m. – 277 dieną), žiemos

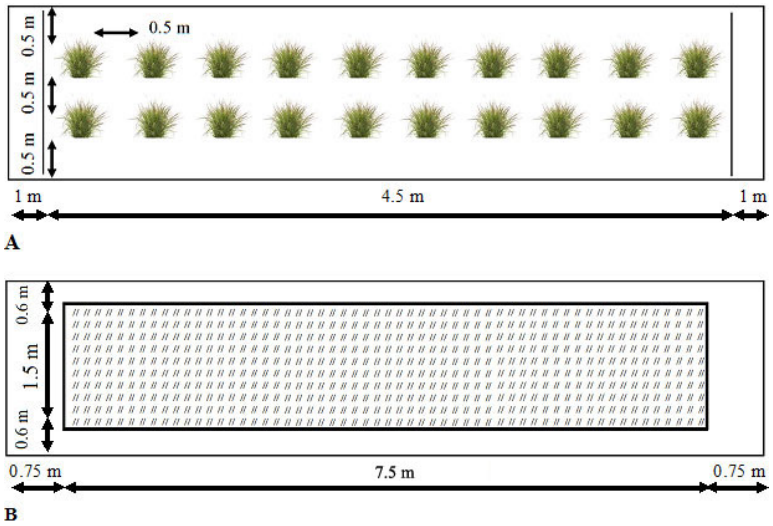
pradžioje (2015 m. – 337 dieną, 2016 m. – 333 dieną) bei po žiemos (2016 m. – 90 dieną, 2017 m. – 91 dieną).

Pjaunant rykštinės soros biomasę žiemos pradžioje ar po žiemos augalai buvo ramybės būsenoje, o jų antžeminės morfologinės dalys – negyvos.

Taip pat lauko eksperimente buvo atliekami skirtingų populiacijų (3 veislių ir hibridinės populiacijos) sėklų derliaus (kg ha^{-1}) tyrimai, pjaunant augalus tik kartą subrendus sėkloms (BBCH 8).

Prieš įrengiant rykštinės soros lauko kolekcijas ir lauko eksperimentą, rudenį laukai buvo suarti, pavasarį prieš sėją ar augalų sodinimą – akėti, kultivuoti, lyginti ir voluoti. Prieš lauko kultivavimą tręšta 15 kg ha^{-1} N, 45 kg ha^{-1} P_2O_5, 70 kg ha^{-1} K_2O. Tyrimų metu, t. y. po augalų pjūties ar kiekvienų metų pavasarį, papildomai azoto, fosforo ir kalio trąšomis rykštinės soros nebuvo tręšiamos. Kiekvienų metų pavasarį ir rudenį tarpueiliai tarp rykštinės soros populiacijų ar eksperimentinių laukelių buvo purenti ketureile freza.

Genetinėse lauko kolekcijose populiacijos buvo išdėstytos dviem pakartojimais, pilna randomizacija. Kolekcijos įrengtos šiltnamyje išaugintus augalus susodinus lizdiniu būdu, t. y. 50 × 50 cm atstumu. Populiacijos laukelio įrengimo schema pavaizduota 5 paveiksle. I kolekcijoje vieną tiriamąją populiaciją atstovavo 14 individų, pasodintų po 7 dviejose eilutėse dviem pakartojimais (iš viso 28 augalai), o II kolekcijoje – 20 individų, pasodintų po 10 dviejose eilutėse dviem pakartojimais (iš viso 40 augalų). I genetinėje lauko kolekcijoje tyrimai truko 5 metus, o II kolekcijoje – 3 metus.



5 paveikslas. Genetinių lauko kolekcijų (A) bei lauko eksperimento (B) tiriamojo populiacijos laukelio įrengimo schema

Figure 5. The scheme of the investigation plot establishment in the genetic collection (A) and field experiment (B)

Lauko eksperimento abi dalys įrengtos trimis pakartojimais, pilna randomizacija. Atskiros populiacijos buvo pasėtos siauraeiliu būdu (30 cm tarp eilučių) į 11,25 m^2 dydžio sėjamuosius laukelius. Vieno tiriamojo laukelio įrengimo schema pavaizduota 5 paveiksle. Populiacijų laukeliai pasėti birželio 10 d. sėjamąja „Hege 76“. Sėklų išsėjimo

norma – 12 kg ha^{-1}. Išsėjimo norma pasirinkta atsižvelgus į rykštinės soros auginimo rekomendacijas (Douglas et al., 2009). Po sėjos, išdygus piktžolėms, ravėta rankomis, o tarpueiliai tarp laukelių – purenti. Lauko eksperimento tyrimų trukmė įskaitant sėjos metus – 3 metai.

Tyrimų dirvožemis. Rykštinės soros genetinės lauko kolekcijos buvo įrengtos karbonatingame glėjiškame vidutinio sunkumo priemolio rudžemyje *Endocalcari-Epihypogleyic Cambisol* (*CMg-p-w-can*). 1 lentelėje pateiktos dirvožemio pagrindinių agrocheminių rodiklių vertės. Dirvožemio granuliometrinė sudėtis nustatyta pagal ISO 11277:2009 standartą. I kolekcijoje smėlis sudarė 59,1 %, dulkės 28,5 %, molis 12,4 %, o II kolekcijoje – 51,1 %, 27,5 %, 21,4 % atitinkamai. Dirvožemio agrocheminiams rodikliams nustatyti ėminiai buvo imami prieš augynų įrengimą ir tyrimams pasibaigus. I ir II kolekcijose cheminės analizės buvo atliktos kiekvienoje iš jų sudarius jungtinį dirvožemio ėminį iš aštuonių lauko vietų. Lauko eksperimentas buvo įrengtas tame pačiame lauke kaip ir II kolekcija, todėl dirvožemio tyrimams buvo suformuotas bendras ėminys.

1 lentelė. Rykštinės soros genetinių lauko kolekcijų ir lauko eksperimento dirvožemio pagrindinių agrocheminių rodiklių vertės

Table 1. The soil chemical properties at the experimental sites

Rodikliai *Values*	C_{org}	$N\text{-}NO_3$	$N\text{-}NH_4$	K_2O	P_2O_5	Ca	Mg	Na	S	pH_{KCl}
	g kg^{-1}	mg kg^{-1}								
Prieš įrengiant kolekcijas / *Before the investigations*										
I Kolekcija *Collection I*	12,3	13,8	2,3	215	348	6064	932	41	2,6	6,2
II Kolekcija *Collection II*	21,3	7,6	1,8	158	196	3294	590	38	2,5	7,1
Tyrimams pasibaigus / *After the investigations*										
I Kolekcija *Collection I*	17,9	4,22	1,76	142	154	5554	1050	-	2,6	7,3
II Kolekcija *Collection II*	23,1	4,29	1,59	162	154	2884	442	-	1,7	6,9

- rodikliai nenustatyti

Dirvožemio pagrindiniai agrocheminiai rodikliai nustatyti: a) pH_{KCl} – potenciometriniu metodu ISO 10390:2005; b) organinės anglies kiekis – remiantis Tiurino metodo modifikacija (Nikitin, 1999), naudojant „šlapio“deginimo procedūrą chromo mišiniu. Anglies kiekis deginiuose išmatuotas spektrofotometru Cary 50 (VARIAN) 590 nm bangos ilgyje naudojant gliukozės standartus; c) mineralinis azotas ekstrahuokas KCl ištraukoje ir jo formos nustatytos LAMMC ŽI Cheminių tyrimų laboratorijoje adaptuotais metodais: jonometriškai ($N – NO_3$), spektrofotometriškai ($N – NH_4$); d) judraus fosforo oksido (P_2O_5) kiekis ir judraus kalio oksido (K_2O) kiekis – pagal LVP D -07:2016, 7 leidimas. Laboratorijos parengtas Egnerio-Rimo-Domingo (A-L) metodas; e) judriojo Ca ir Mg – pagal LVP D-13:20l6, 2 leidimas; f) judri S – pagal LVP D-12:2016; g) Na – pagal LVP D-09:2013.

2.3. Tyrimų metodai ir duomenų statistinė analizė

2.3.1. Rykštinės soros biologinių savybių ir morfologinių požymių vertinimo metodai

Rykštinės soros laukinių populiacijų, selekcinių linijų bei veislių morfologiniai požymiai ir ūkiškai naudingos savybės buvo vertinami absoliučiomis reikšmėmis ir balais, pagal Tarptautinio Augalų genetinių išteklių instituto pateiktus vizualinio vertinimo standartus adaptuotus Jungtinės Šiaurės šalių ir Europos augalų genetinių išteklių programos (The European Cooperative Programme for Plant Genetic Resources) darbinėse grupėse (Tyler et al., 1985). Taip pat naudoti Tarptautinės naujų augalų veislių apsaugos sąjungos (UPOV) vizualinio vertinimo standartai (Millet, 2007).

Laukinės populiacijos, selekcinės linijos ir veislės buvo tiriamos pagal 23 morfologinius požymius ir ūkiškai naudingas savybes:

3. Žiemojimas (%). Pavasarį, prasidėjus vegetacijai, suskaičiuoti žuvę augalai.
4. Kero forma (balais). Vertina plaukėjimo tarpsnio pradžioje. 1 – stati, 3 – pusiau stati, 5 – vidutiniškai stati, 7 – pusiau pasidriekusi, 9 – pasidriekusi.
5. Kero diametras (cm). Matuota augalus nupjovus vegetacijos pabaigoje.
6. Stiebų skaičius (vnt.). Skaičiuoti visi augalo stiebai vegetacijos pabaigoje.
7. Lapų pasvirimo kampas (balais). Vertinta plaukėjimo tarpsnio pradžioje. 1 – status, 3 – atsilošęs, 5 – horizontalus, 7 – pusiau nusviręs, 9 – nusviręs.
8. Lapų spalva (balais). Vertinta plaukėjimo tarpsnio pradžioje. 1 – šviesiai žalia, 2 – žalia, 3 – melsvai žalia.
9. Augalų aukštis (cm). Matuota augalams visiškai išplaukėjus.
10. Vėliavinio lapo ilgis (cm). Matuota augalams žydint.
11. Vėliavinio lapo plotis (cm). Matuota augalams žydint.
12. Viršutinio tarpubamblio ilgis (cm). Matuota augalams visiškai išplaukėjus.
13. Stiebo diametras (mm). Matuota ties trečiu stiebo bambliu augalams visiškai išplaukėjus.
14. Stiebo tarpubamblių skaičius (vnt.). Skaičiuoti visi stiebo tarpubambliai augalams visiškai išplaukėjus.
15. Žiedyno ilgis (cm). Matuota augalams žydint.
16. Atžėlimas po pjūties (cm). Matuotas atolo aukštis praėjus mėnesiui po pjūties.
17. Ankstyvumas (balais). Vertinta kai 50 % augalų populiacijoje pradeda plaukėti. 1 – labai ankstyvas, 3 – ankstyvas, 5 – vidutiniškai ankstyvus, 7 – vėlyvas, 9 – labai vėlyvas.
18. Pagrindiniai augalų vystymosi tarpsniai. Vertinta kas savaitę užrašant pagrindinį tarpsnį naudojant BBCH skalę pagal U. Meier (1997). Fenologinių vystymosi tarpsnių pradžia nurodyta užrašant kalendorinių dienų skaičių (pagal Grigaliaus kalendorių) nuo metų sausio 1 d. pagal R. Ahas et al. (2002).
19. Efektyvių temperatūrų suma (ETS) iki fenologinio tarpsnio pradžios apskaičiuota pagal P. Miller et al. (2001) rekomendacijas. Rykštinės soros biologinio minimumo temperatūra laikyta ≥ 10 °C pagal M. A. Sanderson ir K. J. Moore (1999) bei D. J. Parrish ir J. H. Fike (2005). Fenologinių tarpsnių trukme laikytas laikotarpis tarp gretimų fenologinių tarpsnių pradžios datų.
20. Augalo sėklų derlius (g). Nustatyta išvalius kiekvieno augalo sėklas.
21. Sėklų derlius pasėlyje (kg ha^{-1}). Nustatyta išvalius kiekvieno tiriamojo laukelio sėklas ir perskaičiuojama į sėklų derlių iš hektaro.
22. 1000 sėklų masė (g). Sverta išvalius sėklas.

23. Antžeminės žalios biomasės derlius (g). Genetinėse kolekcijose antžeminės žalios biomasės derlius nustatytas pasveriant kiekvieną nupjautą augalą, o lauko eksperimente – pasveriant nupjautą tiriamąjį laukelį.
24. Biomasės sausųjų medžiagų derlius (g). Sausųjų medžiagų procentas nustatytas prie 105 °C išdžiovinus ėminius iki pastovios masės. Sausųjų medžiagų derlius apskaičiuotas iš sausųjų medžiagų % ir žolės derliaus.
25. Biomasės derliaus struktūra (%). Augalų mėginiai džiovinti iki 14–17 % drėgnumo, išrinktos ir pasvertos priemaišos, atskirti vegetatyviniai ir generatyviniai stiebai, jie suskaičiuoti ir pasverti (g); nuo stiebų atskirti lapai ir žiedynai, jie pasverti (g). Apskaičiuotas lapuotumo procentas.

Daugumos Lietuvoje augančių žemės ūkio kultūrinių augalų vegetacinio periodo pradžia laikomas tas momentas, kai vidutinė paros oro temperatūra pereina per +5 °C (Basalykas, 1958). Šiame tyrime rykštinės soros vegetacijos pradžia nustatyta remiantis G. Persson et al. (2007) metodiniais nurodymais, slenkstine temperatūra laikant +10 °C. Tokia temperatūra atitinka rykštinės soros biologinio vystymosi minimumo temperatūrą (Sanderson, Moore, 1999; Parrish, Fike, 2005).

2.3.2. Populiacijų ploidiškumo nustatymo metodai

Populiacijų ploidiškumo lygmuo buvo nustatomas dviem būdais: 1) mikroskopo pagalba tiesiogiai skaičiuojant chromosomas sudaigintų sėklų šaknelių meristemos metafizinėse plokštelėse. Tam buvo paruošti laikini citologiniai preparatai (Meredith et al., 1995); 2) naudojant tėkmės citometrą Partec GmbH (Vokietija). Vadovaujantis gamintojo pateiktomis instrukcijomis, pasirinktas režimas: Gain=700, L-L=20, Speed=1. Gauti duomenys buvo panaudoti augalų genomo dydžiui, t. y. DNR kiekiui pikogramais (pg) branduoliuose nustatyti. Standartu naudoti kviečiai (*Triticum* spp.), jo DNR kiekis branduoliuose yra žinomas: 2n=32 pg, kas atitinka citometro piko vietą ties 236 rodmeniu. Kiekvieno atskiro augalo DNR (tuo pačiu ir ploidiškumo lygmuo) kiekis perskaičiuotas pagal formulę (Narasimhamoorthy et al., 2008): 2n DNR = (pavyzdžio piko rodmuo citogramoje x standarto 2n DNR kiekis pg): standarto piko rodmuo citogramoje.

2.3.3. Biomasės kokybės vertinimo metodai

Biomasės ėminių paėmimas ir paruošimas cheminei analizei. Cheminei analizei žolės ėminiai imti 1–2 dienas prieš augalų pjūtis. Prieš džiovinimą žolės ėminiai susmulkinti kapokle, 3–5 cm ilgio gabalėliais. Kad žolė neprarastų turėtų cheminių savybių dėl fermentų veiklos, ėminiai fiksuoti 105 °C temperatūroje 15 min. Po fiksavimo žolė džiovinta 60±2 °C temperatūroje. Išdžiovinta žolė sumalta cikloniniu malūnu ZM 200 (Retsch), naudojant 1 mm sietą. Cheminėms analizėms paruošti žolės ėminiai laikyti hermetiškuose užsukamuose indeliuose.

Cheminių analizių metodai. Mėginiuose, kurie gauti augalus pjaunant du kartus per vegetacijos sezoną, nustatyti azoto (N), ląstelienos frakcijų, t. y. neutralaus detergento tirpale netirpios ląstelienos (NDF) ir rūgštaus detergento tirpale netirpios ląstelienos (ADF), rūgštaus detergento tirpale netirpaus lignino (ADL), žalių pelenų, vandenyje tirpių angliavandenių (VTA), krakmolo, anglies (C) bei sieros (S) kiekiai. Mėginiuose, kurie gauti augalus pjaunant vieną kartą per sezoną, be minėtų rodiklių, papildomai nustatytas Klasono lignino kiekis bei ištirta elementinė biomasės sudėtis: natris (Na), kalis (K),

kalcis (Ca), magnis (Mg), fosforas (P), silicis (Si) ir chloras (Cl). Žalių pelenų, N, NDF, ADF, ADL, VTA, C, S, K, Ca, Mg ir P kiekiai nustatyti vadovaujantis perdirbimui ir pašarams skirtų fitožaliavų kokybės tyrimų metodais (Butkutė, Šlepetienė, 2013). Sausosios medžiagos (SM) nustatytos, išdžiovinus mėginį 105 °C temperatūroje iki pastovios masės. Žalių pelenų kiekis augalų masėje nustatytas gravimetrijos metodu, tiriamą medžiagą sausai sudeginus 550 °C mufelinėje krosnyje. Suminio azoto kiekis biomasės mėginyje nustatytas Kjeldalio arba Diuma metodais, azoto rodmuo perskaičiuotas į baltymus, taikant koeficientą 6,25. Ląstelienos frakcijos NDF ir ADF bei ligninas ADL nustatyti vadovaujantis P. J. van Soesto ląstelienos frakcionavimo metodika, modifikavus analizę pagal ANKOM (ANKOM 200 fiber analyzer, ANKOM Technology Fairport, NY). VTA koncentracija biomasėje nustatyta spektrofometriškai su antrono reagentu, naudojant prietaisą Camspec M107. Celiuliozės (Cel) ir hemiceliuliozės (HCel) kiekis apskaičiuotas: Cel = ADF-ADL ir HCel = NDF-ADF. Struktūrinių bei nestruktūrinių angliavandenių suma apskaičiuota: $\sum CH_2O$ = Cel+HCel+VTA+krakmolas. Krakmolas ir vandenyje netirpus nestruktūrinių angliavandenių komponentas, buvo nustatytas augalų biomasės likutyje po VTA išplovimo su etanoliu ir vandeniu. Krakmolas hidrolizuotas iki gliukozės naudojant fermentus α-amilazės ir amilogliukosidazės ir susidariusi gliukozė buvo kiekybiškai nustatyta spektrofotometriškai antrono reagentu kaip VTA (Zhao et al., 2010). Klasono lignino, t. y. 72 % sieros rūgštyje netirpaus mėginio likučio, kiekis nustatytas gravimetriškai (Hatfield et al., 1994).

Elementai C, S ir suminis N nustatyti sauso deginimo būdu simultaniškai (trys rodikliai vienu matavimu) analizatoriumi Vario EL III (Elementar, Germany), alavo folijos indelyje supresuotą mėginį sudeginus deguonies prisotintoje aplinkoje +1150 °C temperatūroje ir deginius matuojant terminio laidumo detektoriumi.

Augaluose ir jų struktūriniuose komponentuose Na, K, Ca, Mg kiekiai nustatyti atominės absorbcijos spektrometru (AAS). Instrumento AAS AAnalyst 200 (Perkin Elmer) parametrai parinkti pagal instrumento gamintojo nuorodas. Bendrasis P kiekis buvo nustatytas po mėginio sudeginimo sieros rūgšties aplinkoje ir reakcijos su molibdato-vanadato tirpalu. Absorbcija buvo matuojama esant 430 nm bangos ilgiui UV-V spektrofotometru (Cary50, Variano, JAV).

Silicio (Si) kiekio analizei mėginiai buvo mineralizuoti pagal W. M. Dai et al. (2005) ir J. E. Kraska, G. A. Breitenbeck (2010) metodinius nurodymus, o chloro (Cl) kiekis nustatytas ekstraktuose vandeniniu kalcio nitrato tirpalu (Gaines et al., 1984; Liu, 1998). Deginiuose Si ir ekstrakte Cl kvantifikuoti spektrofotometriškai su prietaisu Cary 50 UV-Vis (Varian Inc.) 630 nm ir 460 nm bangos ilgiuose atitinkamai.

Darbo metu sukūrus kalibracines lygtis, biomasės cheminės sudėties ištyrimui artimosios srities infraraudonųjų spindulių spektroskopijos (AIRS) metodu, dalies mėginių organiniai cheminės sudėties komponentai išanalizuoti AIRS metodu. Analizavimo tikslumas periodiškai (kasmet) būdavo patikrinamas analizuojant kontrolinius mėginius.

HHV buvo matuojama naudojant kalorimetrinę bombą IKA (C 200, Vokietija), vadovaujantis standartiniu metodu LST CEN / TS 14918.

2.3.4. Tyrimų duomenų statistinė analizė

Kintamųjų skirstinių normalumui patikrinti naudotas Šapiro-Vilk (angl. Shapiro-Wilk test) kriterijus. Įvairių duomenų apdorojimui naudota aprašomoji statistika. Vidurkių lyginimui naudoti t ir F testai. Esminiai skirtumai nustatyti 95 % ir 99 % patikimumo lygmeniu. Duomenų variacijai aprašyti naudota dispersinė analizė (ANOVA). Vidurkių

skirtumai laikyti esminiai kai $p < 0,05$ ir $p < 0,01$. Atskirų rodiklių tarpusavio priklausomybės įvertintos tiesinės regresijos lygtimis bei Pirsono (Pearson) tiesinės koreliacijos koeficientais (r). Išskaičiuota viena iš diskriminavimo charakteristikų – Vilkso (Wilks) lambda (λ). Populiacijų biologinių ir ūkiškai svarbių požymių bei biomasės cheminės sudėties duomenų skaidai įvertinti naudota pagrindinių komponenčių analizė (PCA). Statistinis duomenų įvertinimas atliktas naudojant SAS Enterprise Guide 7.1 programą (SAS Institute Inc), Statistica 7 programą (StatSoft, Inc.) bei MS Excel duomenų analizės paketą Analysis ToolPak.

2.4. Meteorologinės sąlygos

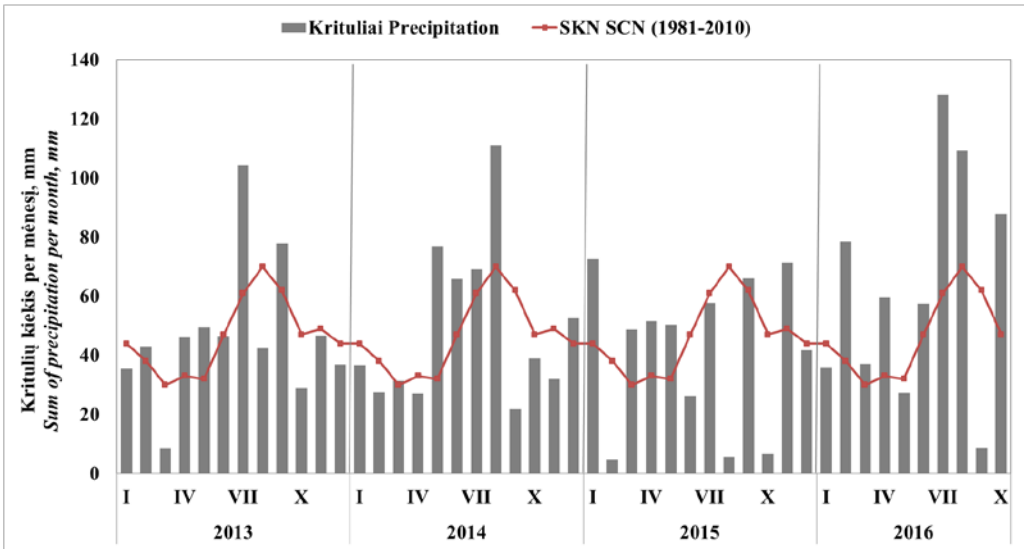
Lietuvos teritorija yra vidutinių platumų klimato zonoje ir priklauso Atlanto kontinentinės miškų srities pietvakariniam posričiui (Galvonaitė, 2007), kuriam charakteringi kaitaus jūrinio ir žemyninio klimato bruožai.

Pagal M. J. Metzger et al. (2012) Europos gamtinę klasifikaciją – Lietuva yra Europos nemoralinės zonos antrajame pazonyje, apibūdinamame žemyniniu, vėsiu vidutiniu klimatu (efektyvių temperatūrų suma 2718) ir trumpu (195 dienos) vegetacijos sezonu. Minėtas autorius nurodo, kad be Lietuvos šiam pazoniui priskiriamos ir Pietvakarių Estijos, Latvijos ir Šiaurės Vakarų Baltarusijos teritorijos.

Palyginus Lietuvos klimato rajonavimo ir USDA sistemos zonų bei pazonių vidutinės minimalios temperatūros intervalus nustatyta, kad Lietuvos teritorijos klimato sąlygos atitinka 5a (rytiniai Lietuvos regionai), 5b (centriniai Lietuvos regionai) ir 6a (vakariniai Lietuvos regionai) augalų ištvermingumo žiemą zonų temperatūros amplitudes. Augalų aklimatizavimui šios zonos yra orientacinės (Navys, 2008). Rykštinės soros tyrimai buvo vykdomi Vidurio Lietuvos žemumoje (55° 23' 33,88", 23° 52' 39,31" pagal WGS koordinačių sistemą), kuri įeina į nelabai atšiaurią 5b zoną, tačiau jai būdingi dažni atlydžiai ir nepastovi sniego danga. Tolimesnė tyrimų metų meteorologinė apžvalga parengta pagal Dotnuvos meteorologinės stoties stebėjimų duomenis.

2013 metai. Žiema buvo ankstyva, ilga su nuolatine nestora (4–16 cm) sniego danga bei nuolatiniu negiliu (13–28 cm) pašalu. Vyravo vėjuoti orai. Pavasaris buvo vėlyvas, trumpas, permainingas, vėjuotas. Šilčiausia buvo gegužė, o šalčiausias ir sausesnis – kovas. Kritulių pavasario mėnesiais iškrito 104,4 mm arba 6 % daugiau nei standartinė klimato norma (SKN). Vidutinė pavasario mėnesių temperatūra buvo 26 % aukštesnė už SKN (7 pav.). Balandžio orai buvo permainingi: pirmasis dešimtadienis – šalti, žiemiški, o vėliau vyravo šiltos dienos, bet šaltos naktys. Žiemkenčių ir daugiamečių žolių vegetacija prasidėjo balandžio 18 – 20 dienomis. Gegužė buvo vėjuota, neįprastai šilta – vidutinė oro temperatūra buvo 25 % aukštesnė nei SKN (6 pav.).

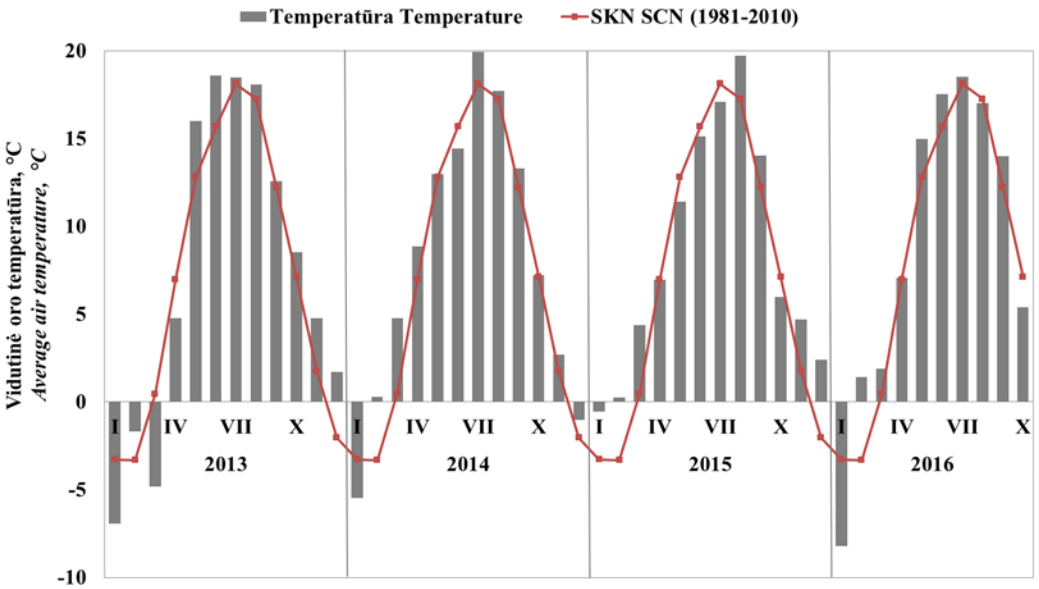
Vasara buvo šilta. Šilčiausias buvo birželis, o lietingesnė – liepa. Vasaros mėnesių paros temperatūros vidurkis siekė 18,4 °C, t. y. 8 % aukštesnis nei SKN. Kritulių iškrito per vasarą 193,1 mm arba 108 % SKN. Rugpjūčio 4–9 dienos buvo labai karštos, aukščiausia oro temperatūra buvo pakilusi iki 28,0–32,1 °C, o mėnesio HTK sudarė 0,8 (norma 1,5).



6 paveikslas. Vidutinis kritulių kiekis (mm) Akademijoje 2013–2016 m.
Figure 6. The average amount of precipitation (mm) in Akademija in 2013–2016 years

Ruduo buvo šiltas, sausas, vėjuotas ir ilgas. Vidutinė rudens mėnesių oro temperatūra buvo 1,5 °C aukštesnė už SKN, o kritulių iškrito 3 % mažiau SKN. Didesnę rugsėjo mėnesio dalį orai buvo šilti ir vėjuoti, tik paskutinįjį penkiadienį atvėso. Keletą naktų dirvos paviršiaus temperatūra buvo neigiama, užfiksuotos šalnos nuo 1,0 iki 2,5 °C šalčio. Šiltesnis buvo antrasis penkiadienis, kai oro temperatūra pakilo iki 21 – 24 °C, o lietingesnė – mėnesio pradžia ir antroji jo pusė. Spalį vyravo šilti, sausi ir ūkanoti orai. Šiltesnis ir lietingesnis buvo trečiasis dešimtadienis. Lapkričio mėnesį orai buvo šilti, lietingi, vėjuoti ir ūkanoti. Dienos buvo šiltos, o naktys vėsios arba kartais su neigiama oro ir dirvos paviršiaus temperatūra. Lapkričio 9 dieną baigėsi aktyvioji žiemkenčių, žieminių rapsų ir daugiamečių žolių vegetacija.

2014 metai. Žiema buvo vėlyva, trumpa, su trumpalaike ir plona (iki 5 cm storio) sniego danga bei vidutiniškai giliu (55–58 cm) pašalu. Sausio mėnesį vyravo vėjuoti orai, kritulių iškrito 83 % SKN, o vasarį 72 % SKN (6 pav.). Šalčiausias buvo trečiasis dešimtadienis, kai žemiausia oro temperatūra nukrito iki 18,6 °C šalčio. Vasario mėnesį vyravo šilti, ūkanoti ir vėjuoti orai. Pavasaris buvo labai ankstyvas ir permainingas temperatūros bei kritulių pasiskirstymo atžvilgiu. Vidutinė pavasario mėnesių oro temperatūra buvo 2,1 °C aukštesnė už SKN, o kritulių iškrito 135,3 mm arba 142 % SKN (6, 7 pav.). Kovo mėnesį orai buvo permainingi. Krituliai buvo mišrūs, iš viso per mėnesį iškrito 104 % SKN. Žiemkenčių vegetacija prasidėjo kovo antrojo dešimtadienio pradžioje, mėnesio viduryje, atvėsus orams – sulėtėjo, o trečiąjį dešimtadienį atšilus ir palijus prasidėjo aktyvesnė žieminių javų, rapsų ir daugiamečių žolių vegetacija. Balandį orai buvo permainingi: vėsiausias buvo pirmasis penktadienis, kuomet oro temperatūra nukrito iki 2–5 °C šalčio. Mėnesio antroje pusėje orai buvo sausi. Lietingesnė buvo gegužė.



7 paveikslas. Vidutinė oro temperatūra (°C) Akademijoje 2013–2016 m.
Figure 7. The average of air temperature (°C) in Akademija in 2013–2016 years

Vasara buvo permaininga temperatūros ir kritulių atžvilgiu: vėsus birželis, labai šilta liepa ir lietingas rugpjūtis bei karštas jo pirmasis dešimtadienis. Kritulių per vasarą iškrito 246,1 mm arba 138 % SKN. Birželį vyravo vėsūs, lietingi ir vėjuoti orai. Liepos mėnesį vyravo labai šilti arba karšti orai, vėsiau buvo mėnesio pradžioje. Šilčiausia diena buvo liepos 29 – oji (32,5 °C). Rugpjūčio pirmasis ir antrasis dešimtadieniai buvo šilti ir karšti. Rugpjūčio 3 ir 4 d. buvo užfiksuoti rekordiniai karščiai 34,6 °C, rugpjūčio 11 ir 12 d. užfiksuoti liūtiniai lietūs, prilijo 22,2 ir 18,0 mm.

Ruduo buvo šiltas, sausas, vėjuotas ir ilgas. Pirmus du rugsėjo dešimtadienius orai buvo vasariškai šilti, sausi ir giedri. Didesnę spalio mėnesio dalį vyravo šilti ir vėjuoti orai. Lapkričio 13 dieną baigėsi žiemkenčių, rapsų ir daugiamečių žolių vegetacija.

2015 metai. Žiema buvo trumpa, be nuolatinės sniego dangos, tik su nuolatiniu negiliu (20 cm gylio) pašalu, kuris laikėsi 94 dienas. Orai buvo nežiemiškai šilti, drėgni, o daugelį dienų ūkanoti ir vėjuoti. Šalčiausia buvo tik sausio 5–8 d., kai temperatūra nukrito iki 10–15 °C. Vidutinė žiemos mėnesių oro temperatūra buvo 3,5 °C aukštesnė už SKN (7 pav.). Vyravo lietūs, šlapdriba bei sniegas.

Pavasaris buvo labai ankstyvas, ilgas, vėjuotas ir kontrastingas temperatūros atžvilgiu. Pavasario mėnesių oro temperatūra buvo 0,8 °C aukštesnė už SKN, o kritulių iškrito 150,6 mm arba 158 % SKN (6, 7 pav.). Kovo mėnesį vyravo sausi, vėjuoti ir šilti orai. Žiemkenčių ir daugiamečių žolių vegetacija prasidėjo antrojo dešimtadienio pradžioje – kovo 11 dieną. Balandžio mėnesį aukščiausia temperatūra pakildavo nuo 13,0 iki 24,0 °C.

Vasara buvo permaininga: šilčiausias, sausiausias ir labai saulėtas buvo rugpjūtis, o birželis ir liepa – vėsūs bei apniukę. Kritulių vasaros mėnesiais iškrito 89,5 mm arba tik 50 % SKN. Lietūs buvo reti ir negausūs, HTK sudarė 0,6 (norma 1,4). Beveik visą vasarą drėgmės kiekis vietinėms daugiametėms žolėms buvo kritinis. Birželį vyravo vėsūs, sausi, dažnai debesuoti orai. Liepą vyravo vidutiniškai šilti, debesuoti ir vėjuoti orai, tik pirmojo

dešimtadienio dienomis buvo karšta, aukščiausia temperatūra pakilo iki 28,1 – 30,7 °C. Kritulių iškrito 94 % SKN. Rugpjūtis buvo išskirtinai šiltas, sausas ir labai šiltas. Rugpjūčio 8 d. užfiksuota aukščiausia oro temperatūra 35,0 °C.

Rugsėjo pirmasis penkiadienis ir antrasis dešimtadienis buvo šilti, dienomis oro temperatūra pakildavo iki 20,0 °C. Kritulių per mėnesį iškrito 106 % SKN. Spalio orai buvo permainingi, sausi, kritulių iškrito 14 % SKN. Lapkričio 21-ą dieną, paros vidutinei oro temperatūrai nukritus žemiau 5,0 °C, sustojo daugiamečių žolių vegetacija.

2016 metai. Žiema buvo šilta, ūkanota. Vidutinė sausio mėnesio oro temperatūra nukrito iki -8,2 °C arba buvo 4,9 % žemesnė nei SKN. Kritulių per mėnesį iškrito 35,9 mm, kas sudaro 85,5 % SKN. Vasario mėnesio vidutinė oro temperatūra buvo 1,4 °C, o kritulių iškrito 78,5 mm (6, 7 pav.).

Pavasari buvo šiltas, lietingas ir vėjuotas. Pavasario mėnesių vidutinė oro temperatūra buvo 1,2 °C aukštesnė už SKN, o kritulių iškrito 123,9 mm arba 130 % SKN (6, 7 pav.). Kovo 28-tą dieną vidutinei paros temperatūrai viršijus 5 °C prasidėjo aktyvi augalų vegetacija.

Vasaros orai buvo labai permainingi: birželio mėn. pradžioje – šilti, vėliau – vėsūs. Liepa – lietinga, vėjuota, o vidutinė oro temperatūra (18,5 °C) buvo artima SKN (18,1 °C). Rugpjūtis nebuvo itin šiltas, temperatūrų atžvilgiu permainingas ir labai lietingas. Vasaros mėnesių vidutinė oro temperatūra buvo 0,62 °C aukštesnė už SKN, o kritulių iškrito 294,8 mm arba 165 % SKN (6, 7 pav.).

Rudens pradžia buvo sausa, šilta ir giedra. Vidutinė rugsėjo ir spalio mėnesių oro temperatūra buvo artima SKN, o kritulių iškrito 88 % SKN. Nuo spalio 11-os dienos, paros vidutinei oro temperatūrai nukritus žemiau 5 °C šilumos, baigėsi aktyvioji žiemkenčių, rapsų ir daugiamečių žolių vegetacija.

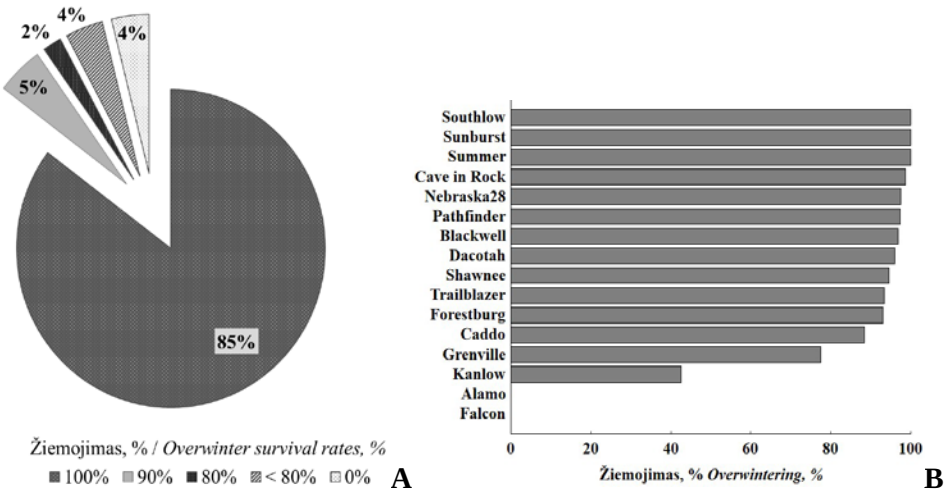
3. TYRIMŲ REZULTATAI IR APTARIMAS

3.1. Rykštinės soros populiacijų įvairovės įvertinimas pagal biologines savybes ir morfologinius požymius

3.1.1. Žiemojimo ir fenologinių vystymosi tarpsnių įvertinimas

Žiemojimas. Atsparumas žiemos pakenkimams yra svarbiausias veiksnys, lemiantis augalo introdukcijos sėkmę. Pakenkimų pobūdis labai priklauso nuo klimato ypatumų, tačiau vienodai svarbios ir augalo biologinės savybės, kilmė, pasirengimo žiemai laikas (Navys, 2008). Literatūroje duomenų apie rykštinės soros adaptaciją Europos nemoralinės zonos šalyse trūksta, nors manoma – Europoje šios rūšies augalai galėtų būti auginami dar šiauresnėse platumose nei JAV (Elbersen et al., 2001; Barney, Di Tomaso, 2011).

Rykštinės soros augalų pirmų žiemojimo metų rezultatų analizė parodė, kad ištvermingiausios populiacijos (žiemojimas = 100 %) sudarė net 85 % I ir II kolekcijų visų genetinių išteklių (8 pav. A). Dauguma jų yra laukinės populiacijos kilusios iš Šiaurės Dakotos. Lietuvoje neperžiemojo (žuvusių augalų = 100 %) arba blogai žiemojo (žuvusių augalų > 20 %) populiacijos kilusios iš Teksaso, Pietų Ilinojaus, Arkanzaso, Naujosios Meksikos ir kitų šiltesnio klimato valstijų, tačiau jos tesudarė 8 % visų tirtų rykštinės soros genetinių išteklių.



8 paveikslas. Rykštinės soros genetinių išteklių (A) ir atskirai veislių (B) pirmų žiemojimo metų analizė. Skaičiai A diagramoje rodo išgyvenusių populiacijų procentą.

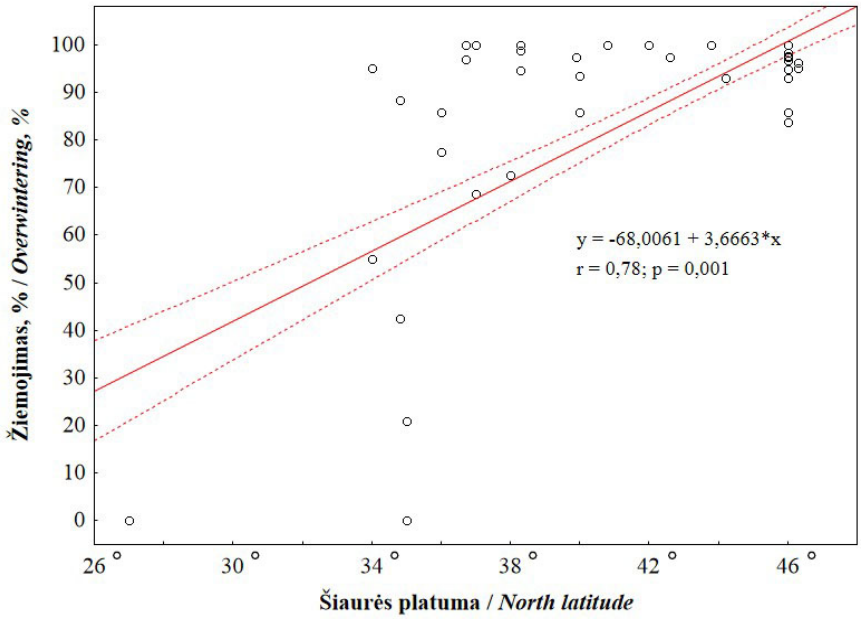
Figure 8. The first winter survival of the genetical resources (A) and separately – cultivars (B) of switchgrass in Lithuania. Numbers in the pie chart A indicate percentage of overwintered populations

Visų laukinių populiacijų ir veislių pirmą žiemą išgyvenę augalai vėlesniais (antrais – ketvirtais) augimo metais žiemojo be pažeidimų. Rykštinės soros jaunų augalų polinkį blogiau žiemoti ir didesnį jų jautrumą žiemos pažaidoms patvirtina ir kiti tyrėjai (Elber-

sen et al., 2001; Christian et al., 2001). D. Christian et al. (2001) ištyrę *Miscanthus sacchariflorus* žiemojimą nustatė, kad prastas pirmamečių augalų žiemojimas gali turėti kelias priežastis. Manoma, kad pirmais metais augalai nespėja išvystyti stiprios šaknų sistemos ir šaknyne sukaupti atsarginių maisto medžiagų rezervo, reikalingo žiemos laikotarpiu. Šiaurinėse platumose pietinės kilmės trumpadieniai augalai vegetacijai baigiantis nespėja pasiekti galutinių brandos tarpsnių, o toliau augindami antžeminę ir požeminę fitomasę – nepasiruošia biologiniam ramybės periodui.

Ištyrus rykštinės soros veislių pirmų metų žiemojimą nustatyta, kad ištvermingiausios buvo veislės 'Summer', 'Sunburst' ir 'Southlow', kurių visi augalai peržiemojo be pažeidimų (8 pav. B). Labai gerai žiemojo (išgyvenusių augalų > 90 %) veislės 'Forestburg', 'Dacotah', 'Cave in Rock', 'Pathfinder', 'Blackwell', 'Nebraska28', 'Shawnee' ir 'Trailblazer'. Dviejų veislių, kilusių iš Teksaso ir Oklahomos, augalai pirmais žiemojimo metais žuvo. Tai veislės 'Alamo' ir 'Falcon', kurios yra priskiriamos žemumų ekotipui.

M. D. Casler ir A. R. Boe (2003) ištyrę rykštinės soros žiemojimą įvairiuose JAV regionuose pastebėjo, kad šis požymis varijuoja. Autoriai mano, kad jis yra nulemtas genotipo prieraišumo kilmės vietos geografinei platumai ir ilgumai. Dalis rykštinės soros populiacijų gali augti įvairiose geografinėse platumose, o kitos – yra gana siaurų adaptacijos ribų (Casler, Boe, 2003; Casler et al., 2004). Mūsų tyrimuose nustatyta, kad rykštinės soros populiacijų žiemojimas Lietuvoje buvo statistiškai patikimai priklausomas nuo jų geografinės kilmės (r = 0,783, p = 0,001), o 61 % duomenų aprašančių populiacijų žiemojimą kito priklausomai nuo jų geografines kilmes parametrų (t. y. platumos) (9 pav.).



9 paveikslas. Rykštinės soros populiacijų žiemojimo priklausomybė nuo jų geografinės kilmės

Figure 9. The relationship between overwinter survival and geographic origin of switchgrass populations

Fenologiniai vystymosi tarpsniai. Kiekviena augalų rūšis turi savitą augimo ritmą ir vystymosi trukmę. Selekcijoje, siekiant optimizuoti rykštinės soros produktyvumo elementų formavimąsi, būtina suprasti jos vegetatyvinio bei generatyvinio vystymosi biologinius dėsningumus. Fenologinių vystymosi tarpsnių tyrimai aktualūs ir tuo, kad padeda geriau pažinti augalų introdukcijos ir aklimatizacijos savybes.

Duomenų apie rykštinės soros vegetacijos pradžią Europoje publikuota mažai. Išanalizavus mūsų tyrimų duomenis nustatyta, kad Lietuvoje rykštinės soros vegetacija prasidėjo mėnesiu vėliau nei vietinių rūšių žolių, t. y. balandžio mėnesio pabaigoje –gegužės mėnesio pradžioje (2015 m. – balandžio 28 d., 2016 m. – gegužės 4 d.). Literatūros šaltiniuose nurodoma, kad rykštinė sora Šiaurės Amerikos Didžiųjų Lygumų prerijose pavasario vegetaciją pradeda vėlai, tačiau ten šis laikotarpis yra kovo – balandžio mėnesiais. Lietuvoje rykštinė sora vegetaciją baigė spalio mėnesio pradžioje (2015 m. – spalio 09 d., 2016 m. – spalio 07 d.), o šios rūšies vegetacijos periodas truko nuo 164 dienų (2015 m.) iki 156 dienų (2016 m.).

Moksliniuose tyrimuose rūšies ankstyvumo įvertinimui nustatoma ir plaukėjimo pradžia. Rykštinė sora yra jautri fotoperiodo trukmei, t. y. jos perėjimas į generatyvinių struktūrų formavimo ir auginimo tarpsnį priklauso nuo trumpųjų dienų režimo. 2 lentelėje pateikta rykštinės soros genetinių išteklių (n = 99) plaukėjimo tarpsnio pradžios duomenų statistinė analizė.

2 lentelė. Rykštinės soros (n = 99) plaukėjimo pradžia Lietuvoje, 2015 ir 2016 m. Plaukėjimo tarpsnio pradžia nurodyta kalendorinių dienų skaičiumi nuo metų sausio 1 d.

Table 2. The beginning of heading of switchgrass (n = 99) in Lithuania in 2015 and 2016. The beginning of heading stage is expressed by the number of calendar days since the 1 of January

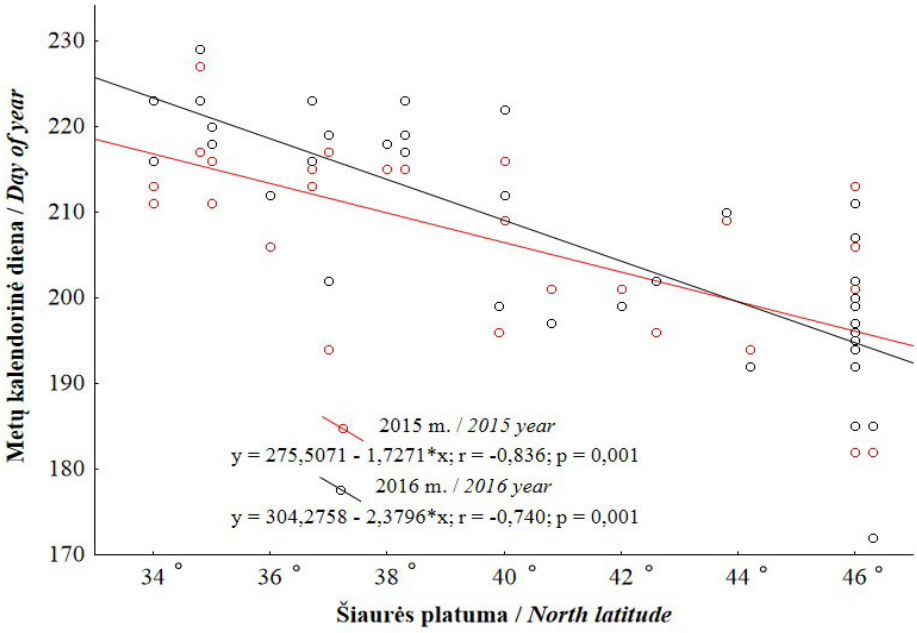
Metai / *Year*	***Vid. / Mean***	***Moda / Mode***	***Min.***	***Maks. / Max.***	***SD***	***CV %***
2015	200	194	182	227	9,84	4,90
2016	201	192	172	229	12,01	5,96

Tyrimų metais nustatyta, kad rykštinė sora pradėjo plaukėti (BBCH 5) vidutiniškai liepos viduryje (200 – 201 kalendorinę dieną), o plaukėjimo pradžios variacija buvo maža (2 lentelė). Tarp anksčiausiai ir vėliausiai pradėjusių plaukėti populiacijų nustatytas nuo 45 (2015 m.) iki 57 dienų (2016 m.) skirtumas. C. M. Taliaferro (2003) Oklahomoje ištyręs 113 skirtingos kilmės populiacijų plaukėjimą tarp ankstyviausių ir vėlyviausių augalų nustatė 78 dienų skirtumą.

Šiaurinėse platumose rykštinės soros augalų vegetacijos pradžia yra vėlyvesnė, tačiau žydėjimo pradžia ir branda – ankstyvesnė (Lowry et al., 2014). Palyginus mūsų tyrimų plaukėjimo pradžios duomenis su pateiktais literatūroje nustatyta, kad Lietuvoje rykštinė sora yra ankstyvesnė nei pietesnių platumų šalyse. Pavyzdžiui, Kolorado, Vajomingo, Montanos, Nebraskos, Šiaurės ir Pietų Dakotos valstijose rykštinės soros plaukėjimo tarpsnis prasideda liepos mėnesį, tačiau dar piečiau esančiose valstijose, pvz., Kanzase, Misūryje – rugpjūčio mėnesį (Uchytil, 1993). Viskonsine rykštinė sora pradeda plaukėti vidutiniškai 217 metų dieną, o Minesotoje – 224 d. (Olson, 1984, Berdahl et al., 2005), Oklahomoje – 215 d., tačiau varijuoja nuo 167 iki 245 d., priklausomai nuo genotipo (Taliaferro, 2003). Europos šalyse duomenų apie rykštinės soros plaukėjimo pradžią publikuota labai mažai. Pavyzdžiui, Italijoje rykštinė sora pradeda plaukėti vidutiniškai liepos–rugpjūčio mėnesiais, tačiau vėlyviausios populiacijos gali plaukėti ir rugsėjį (Pis-

cioneri et al., 2001). Centrinėje Ukrainoje rykštinė sora pradeda plaukėti rugpjūčio mėnesio viduryje arba vidutiniškai 228 metų dieną (Кулик, 2013). Vis dėlto palyginti šiuos duomenis galima tik sąlyginai, nes skirtingose šalyse yra nevienodos aplinkos sąlygos, taip pat galima didelė duomenų variacija dėl tyrimuose naudotų nevienodų genotipų.

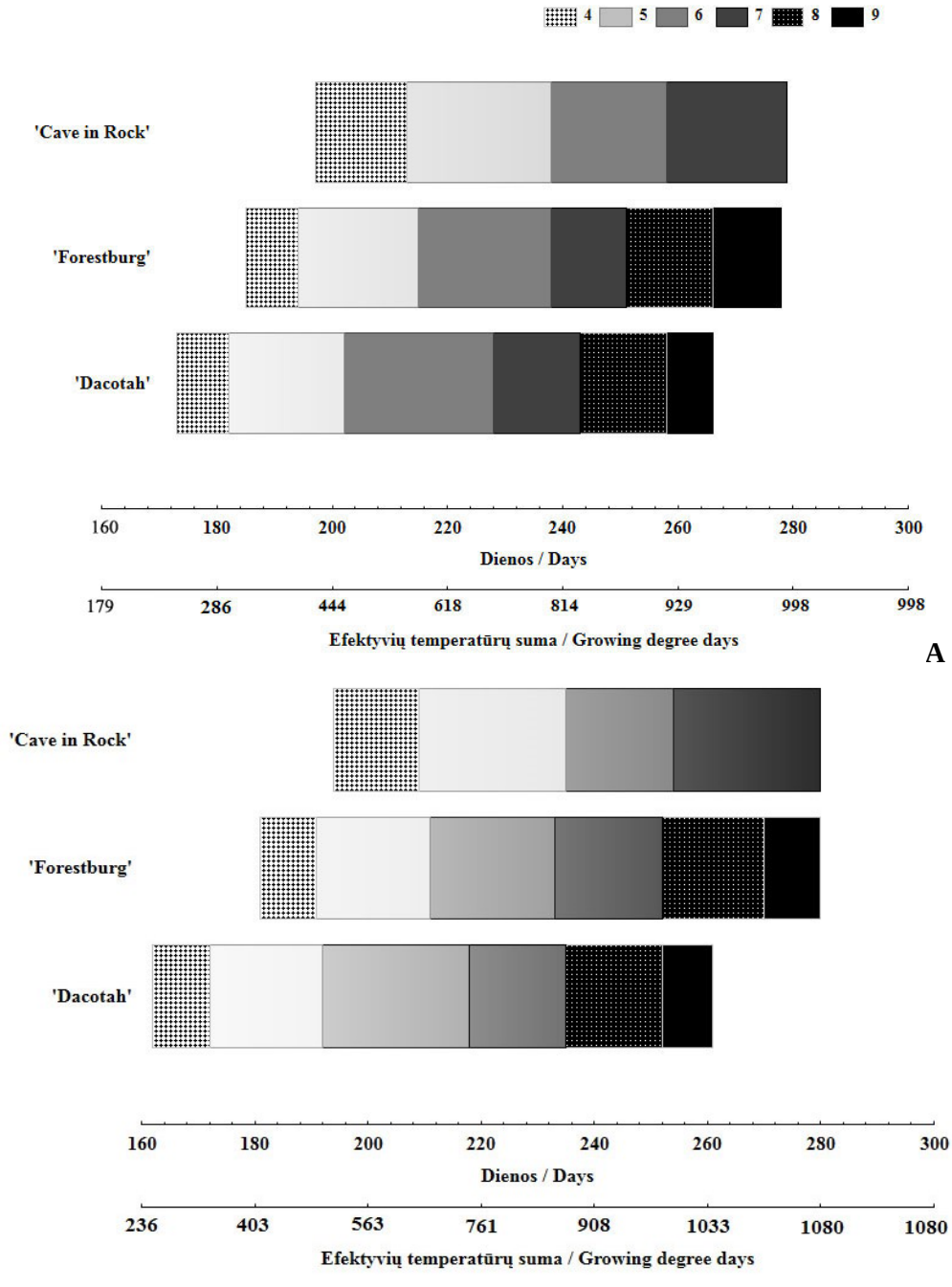
C. E. Tornqvist et al. (2017) nustatė genus, kontroliuojančius rykštinės soros žydėjimo iniciaciją. Šiuose tyrimuose autoriai pastebėjo, kad skirtingos kilmės genotipai yra nevienodai jautrūs fotoperiodo trukmei. Mokslininkai mano, kad greta endogeninių ir egzogeninių veiksnių reguliuojančių rykštinės soros žydėjimą, svarbi yra ir genotipo kilmė (geografinė platuma). Įdomu tai, kad pietinių platumų genotipai turi mažesnį jautrumą fotoperiodui (McMillan, 1959). Atlikus rykštinės soros skirtingos kilmės populiacijų plaukėjimo pradžios ir jų kilmės platumos regresinę analizę tarp šių požymių nustatyta stipri neigiama priklausomybė (2015 m. r = -0,836, p = 0,001; 2016 m. r = -0,740, p = 0,001). Pirmais metais 69 %, o antrais – 54 % duomenų aprašančių populiacijų plaukėjimo pradžią kito priklausomai nuo jų geografines kilmes parametrų (10 pav.).



10 paveikslas. Rykštinės soros populiacijų plaukėjimo pradžios priklausomybė nuo jų geografinės kilmės, 2015 ir 2016 m. Plaukėjimo tarpsnio pradžia nurodyta kalendorinių dienų skaičiumi nuo metų sausio 1 d.

Figure 10. The relationship between the beginning of heading (day of year) and the geographic origin of switchgrass populations in 2015 and 2016. The beginning of heading stage is expressed in calendar days since the 1 of January

Kiekvienos rūšies augalai pilnam savo išsivystymui turi sukaupti nustatytą efektyvių temperatūrų sumą (Basalykas, 1958). Siekiant nustatyti rykštinės soros šiluminį optimumą Lietuvoje buvo sudarytas trijų veislių fenologinis vystymosi spektras (11 pav.).



11 paveikslas. Rykštinės soros veislių 'Dacotah', 'Forestburg' ir 'Cave in Rock' fenologiniai vystymosi spektrai 2015 (A) ir 2016 (B) metais. Pagrindiniai vystymosi tarpsniai: 4 – vamzdelėjimas, 5 – plaukėjimas, 6 – žydėjimas, 7 – sėklų vystymasis ir augimas, 8 – sėklų branda, 9 – senėjimas

Figure 11. Phenological stages of switchgrass cultivars 'Dacotah', 'Forestburg' and 'Cave in Rock' in 2015 (A) and 2016 (B) years. Principal growth stages: 4 – booting, 5 – inflorescence emergence, heading, 6 – flowering, anthesis, 7 – development of fruit, 8 – ripening, 9 – senescence

Rykštinės soros fenologiniam spektrui sudaryti pasirinktos trys skirtingos kilmės veislės: 'Dacotah' kilusi iš Šiaurės Dakotos (46° šiaurės platuma), 'Forestburg' – iš Pietų Dakotos (44° šiaurės platuma) ir 'Cave in Rock' – iš Ilinojaus (38° šiaurės platuma). Fenologinio vystymosi spektro pirminiu diskrečiu tarpsniu pasirinkta stiebų vamzdelėjimo pradžia (BBCH 4), nes vegetatyvinių struktūrų vystymosi tarpsniai yra tolydūs, pavyzdžiui, lapų augimas tęsiasi ir pasirodžius generatyviniams organams (Moore, Moser, 1995; Zegada-Lizarazu et al., 2012).

Gauti rezultatai parodė, kad veislės 'Dacotah' augalų vegetacijos trukmė Lietuvoje truko 148 (2015 m.) – 142 (2016 m.) dienas. Veislės 'Forestburg' augalų vegetacija truko šiek tiek ilgiau, t. y. nuo 160 (2015 m.) iki 155 (2016 m.) dienų, o iš pietesnių platumų kilusios veislės 'Cave in Rock' augalai sėklų vystymosi ir brandos tarpsnių per vegetacijos laikotarpį pasiekti nespėjo. Spalio mėnesio pradžioje 'Cave in Rock' augalai pradėjo brandinti sėklas, tačiau po pirmųjų rudeninių šalnų – vegetaciją baigė.

Tyrimų metais anksčiausiai pradėjo plaukėti (BBCH 5) veislės 'Dacotah' augalai, t. y. 182 (2015 m.) ir 172 (2016 m.) kalendorinę dieną (11 pav.). Veislės 'Forestburg' augalai tyrimo metais plaukėjo 12 – 19 dienų vėliau, o 'Cave in Rock' – 31 ir 37 dienomis vėliau nei veislės 'Dacotah'. Nustatytą tirtų veislių ankstyvumo tendenciją patvirtina ir kiti autoriai, tačiau Lietuvoje tyrimų metais skirtumai tarp veislių, pagal plaukėjimo pradžią, buvo mažesni. Olson (1984) nustatė, kad Minesotos valstijoje rykštinės soros kilusios iš Šiaurės Dakotos pradėjo plaukėti 23 dienomis anksčiau nei veislės 'Forestburg' augalai ir 45 dienomis anksčiau nei 'Cave in Rock' augalai, o veislės 'Forestburg' augalai buvo 22 dienomis ankstyvesni nei 'Cave in Rock' augalai.

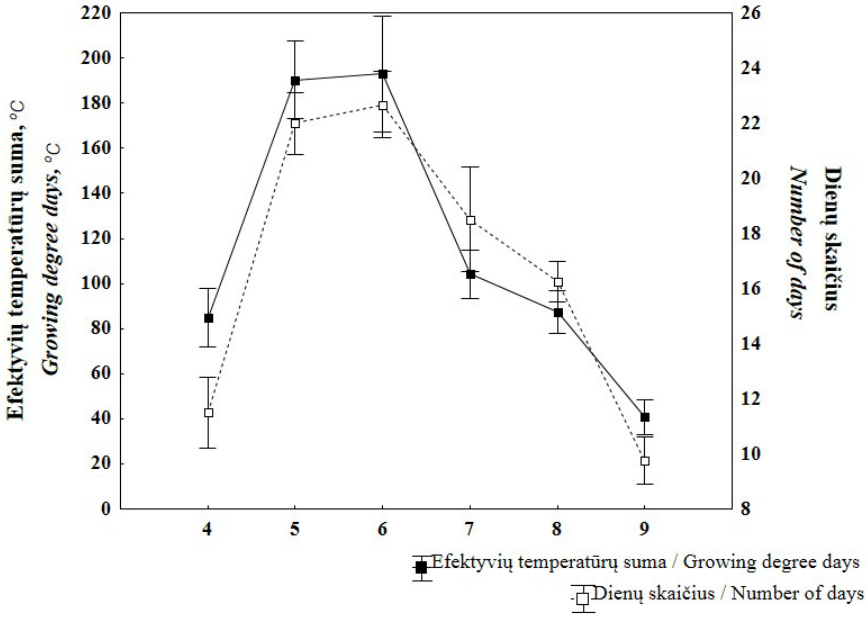
Anksčiausiai žydėti (BBCH 6) pradėjo taip pat veislės 'Dacotah' augalai, t. y. 228 (2015 m.) ir 218 (2016 m.) kalendorinę dieną. Veislės 'Forestburg' augalai atitinkamais metais atsiliko 10 – 15 dienų, o 'Cave in Rock' – nuo 30 iki 36 dienų. Palyginus vystymosi tarpsnių trukmę nustatyta, kad iš pietesnių platumų kilusios veislės 'Cave in Rock' augalai buvo ne tik vėlyviausi, bet ir ilgiausiai žydėjo. Veislės 'Dacotah' ir 'Forestburg' augalai pagal atskirų brandos tarpsnių trukmę skyrėsi nežymiai.

Fenologinis spektras atskleidė skirtingą trijų veislių šiluminį optimumą vystymosi ir brandos metu (11 pav.). Veislės 'Dacotah' žydėjimo tarpsnis prasidėjo esant 470 (2015 m.) – 498 (2016 m.) efektyvių temperatūrų sumai (toliau – ETS), 'Forestburg' – 548 (2015 m.) ir 678 (2016 m.), o 'Cave in Rock' – 808 (2015 m.) ir 864 (2016 m.) ETS. Sėklų vystymosi ir augimo tarpsnį veislės 'Dacotah' augalai pradėjo esant 724 (2015 m.) – 745 (2016 m.) ETS, o 'Forestburg' – 793 (2015 m.) ir 842 (2016 m.) ETS. Šiame tarpsnyje 'Cave in Rock' augalai buvo reikliausi šilumai: jie sėklas pradėjo formuoti esant 924 (2015 m.) ir 996 (2016 m.) ETS.

Remiantis vidutiniais dvejų metų rykštinės soros veislių fenologiniais vystymosi tarpsnių duomenimis nustatyta, kad atskirų tarpsnių trukmė ($F_{fakt.}$ = 15,32; p = 0,001) ir šiluminis optimumas ($F_{fakt.}$ = 13,23; p = 0,001) tarpusavyje statistiškai patikimai skyrėsi. Plaukėjimo ir žydėjimo tarpsniai truko ilgiausiai, tačiau jų trukmė tarpusavyje esminiai nesiskyrė (12 pav.). Rykštinės soros augalai plaukėjo vidutiniškai 22 dienas, o žydėjo – vidutiniškai 23 dienas. Šių tarpsnių metu sukauptos ETS buvo esminiai didžiausios: plaukėjimo metu – vidutiniškai 190 ETS, žydėjimo – vidutiniškai 193 ETS.

Sėklų vystymosi ir brendimo tarpsniai vidutiniškai truko 19 ir 16 dienų, o nustatyta efektyvių temperatūrų suma buvo – 104 ir 87 ETS atitinkamai. Rykštinės soros vystymasis nuo plaukėjimo pradžios iki pilnos sėklų brandos Lietuvoje vidutiniškai truko 80 dienų. Literatūroje nurodoma, šio laikotarpio trukmė yra nuo 68 iki 89 dienų ir varijuoja

priklausomai nuo genotipo kilmės (Olson, 1984). Trumpiausias buvo (10 dienų) augalų senėjimo tarpsnis, kurio metu sukaupta 41 ETS.



12 paveikslas. Rykštinės soros vidutinė fenologinių vystymosi tarpsnių trukmė ir jų metu sukaupta efektyvių temperatūrų suma 2015–2016 m. Pagrindiniai vystymosi tarpsniai: 4 – vamzdelėjimas, 5 – plaukėjimas, 6 – žydėjimas, 7 – sėklų vystymasis ir augimas, 8 – sėklų branda, 9 – senėjimas. Grafike pažymėtos standartinės paklaidos

Figure 12. The average duration of phenological stages of switchgrass and accumulated growing degree days from the beginning to the end of the stage in 2015–2016. Principal growth stages: 4 – booting, 5 – inflorescence emergence, heading, 6 – flowering, anthesis, 7 – development of fruit, 8 – ripening, 9 – senescence. Error bars indicate standard error of the mean

Apibendrinimas. *Rykštinės soros augalų žiemojimo ir fenologinių vystymosi tarpsnių analizė Lietuvoje patvirtino hipotezę, kad genotipo kilmė yra svarbus veiksnys lemiantis jos adaptaciją ir introdukcijos sėkmę. Laukinės populiacijos ir veislės, kilusios iš šiltesnio klimato JAV valstijų pirmų, metų žiemą neperžiemojo arba blogai žiemojo Lietuvoje. Visos populiacijos kilusios iš Šiaurės Dakotos buvo ištvermingiausios pagal žiemojimo rezultatus. Visi pirmą žiemą išgyvenę augalai vėlesniais metais žiemojo be pažeidimų.*

Rykštinė sora Lietuvoje pradėjo plaukėti vidutiniškai liepos viduryje (200 – 201 kalendorinę dieną). Iš Šiaurės Dakotos kilusi veislė 'Dacotah' buvo ankstyviausia visuose fenologiniuose vystymosi tarpsniuose lyginant su kitomis tirtomis veislėmis, o jos vegetacijos trukmė Lietuvoje truko 142 – 148 dienas. Iš pietesnių platumų kilusi veislė 'Cave in Rock' žydėjo vėliausiai ir sėklų brandos tarpsnio per vegetacijos laikotarpį pasiekti nespėjo.

Skirtingos kilmės veislių šiluminis optimumas vystymosi ir brandos eigoje taip pat buvo skirtingas. Veislė 'Cave in Rock' buvo reikliausia šilumai: ji sėklų vystymosi ir augimo tarpsnį pradėjo esant 924 – 996 ETS. Iš šiauresnių platumų kilusios veislės 'Daco-

tah' šis tarpsnis prasidėjo esant 724 – 745 ETS. Atskirų fenologinių vystymosi tarpsnių trukmė dienomis taip pat buvo skirtinga. Plaukėjimo ir žydėjimo tarpsniai truko ilgiausiai, tačiau jų trukmė tarpusavyje esminiai nesiskyrė. Rykštinės soros vystymasis nuo plaukėjimo pradžios iki pilnos sėklų brandos Lietuvoje vidutiniškai truko 80 dienų.

3.1.2. Biologinių savybių ir morfologinių požymių nustatymas

Literatūroje nurodoma, kad rykštinės soros morfologiniai požymiai ir fiziologinės ypatybės labai varijuoja priklausomai nuo aplinkos veiksnių, ekotipo ir genotipo įtakos (Casler, 2012). Todėl šiame darbe buvo ištirta rykštinės soros genetinių išteklių fenotipinių požymių ir ūkiškai naudingų savybių įvairovė bei jų kitimo ribos (3 lentelė).

3 lentelė. Rykštinės soros laukinių populiacijų ir veislių pagrindinių morfologinių požymių ir ūkiškai naudingų savybių vertės 2015–2016 m.

Table 3. Summary of the basic morphological and economically useful properties characteristics of switchgrass wild populations and cultivars in 2015–2016

Požymiai ***Traits***	**Matavimo vienetai** ***Units***	**Vid.** ***Mean***	**Moda** ***Mode***	***SD***	***Min.***	**Maks.** ***Max.***	***CV %***
Kero forma *Bunch habit*	Balai *Points*	-	3	-	1	5	-
Kero diametras *Bunch diameter*	cm	22,08	23,84	1,72	18,90	24,85	7,82
Augalo aukštis *Plant height*	cm	171,41	173,03	14,02	128,50	198,33	8,18
Atžėlimas po pjūties *Regrowth after cut*	cm	93,76	94,39	9,31	71,75	110,92	9,93
Stiebų skaičius kere *Number of stems per bunch*	Vnt. *Number*	88,62	87,31	17,12	57,41	146,37	19,31
Vegetatyvinių stiebų skaičius *Number of vegetative tillers*	Vnt. *Number*	14,82	22,12	7,03	5,25	36,00	47,41
Generatyvinių stiebų skaičius *Number of productive tillers*	Vnt. *Number*	74,19	72,87	14,92	43,54	129,00	20,11
Lapuotumas *Leafiness*	%	40,14	39,56	5,05	32,07	52,84	12,59
Lapų pasvirimo kampas *Attitude of leaf blade*	Balai *Points*	-	3	-	1	5	-
Vėliavinio lapo ilgis *Length of flag leaf*	cm	40,81	40,83	5,39	20,63	53,50	13,21
Vėliavinio lapo plotis *Width of flag leaf*	cm	0,98	0,96	0,12	0,73	1,37	10,55
Žiedyno ilgis *Length of panicle*	cm	32,13	31,06	4,51	21,66	44,34	14,04
1000 sėklų masė *Weight of thousand seeds*	g	1,28	1,15	0,35	0,81	2,29	27,28
Augalo sėklų derlius *Seed yield per plant*	g	22,88	20,73	10,72	8,25	78,00	46,87
Sėklų derlius ploto vienete *Seed yield per plot*	kg ha^{-1}	106,00	106,73	59,83	40,11	170,42	56,44

Remiantis vidutiniais dvejų metų rykštinės soros morfologinių požymių ir ūkiškai naudingų savybių duomenimis nustatyta, kad stabiliausi (CV < 10 %) fenotipiniai požymiai yra kero diametras ir augalų aukštis. Rykštinės soros populiacijų kero diametras svyravo nuo 18,90 cm iki 24,85 cm ir vidutiniškai siekė 22,08 cm. Plačiausius kerus turėjo laukinės populiacijos Nr. 113, 115, 118 ir veislė 'Grenville', kurių kero plotis buvo virš 24 cm. Vidutinis tirtų rykštinės soros populiacijų aukštis siekė 171,41 cm. Net 58,69 % populiacijų aukštis svyravo 160 – 180 cm intervale, o 8,69 % populiacijų turėjo didesnį nei 190 cm aukštį. Tai laukinės populiacijos kilusios iš Šiaurės Dakotos (Nr. 50, 104, 117, 126, 130, 132, 133) ir veislė 'Kanlow' kilusi iš Oklahomos valstijos. Vis dėlto, statistiškai patikimų augalų aukščio skirtumų tarp populiacijų (lyginant su I ir II kolekcijos vidurkiu) nenustatyta.

Po pirmos pjūties atžėlusių augalų aukštis taip pat buvo stabilus (CV < 10 %). Rykštinės soros populiacijų vidutinis atolo aukštis po pirmos pjūties buvo 93,76 cm. Geriausiai atžėlė laukinė populiacija Nr. 132, kurios atolo aukštis buvo 18,30 % s lyginant su bandymo vidurkiu. Tačiau skirtumas buvo statistiškai nepatikimas.

Vėliavinio lapo plotis ir ilgis, žiedyno ilgis, augalų lapuotumas bei stiebų skaičius kere vertintini kaip vidutiniškai kintantys (10 % < CV < 20 %) požymiai. Rykštinės soros populiacijų vidutinis lapų plotis buvo 0,98 cm, o 51,54 % populiacijų lapų plotis svyravo 0,90 – 1,00 cm intervale. Plačiausius lapus, t. y. 1,30 – 1,40 cm intervale, turėjo laukinės populiacijos Nr. 2 ir 55 bei veislės 'Cave-in-Rock' ir 'Kanlow'. Morfologinių požymių vertinimo metu nustatyta, kad vidutinis lapų ilgis buvo 40,81 cm; 31,95 % populiacijų lapų ilgis svyravo 40 – 45 cm intervale, o 36,08 % populiacijų – nuo 35 iki 40 cm. Ilgiausi lapai (50 – 55 cm) būdingi laukinėms populiacijoms Nr. 42, 117, 127, 129, kilusioms iš Šiaurės Dakotos. Vidutinis žiedyno ilgis buvo 32,13 cm, o artimą vidurkiui (30 – 35 cm intervale) žiedyno ilgį turėjo 42,10 % populiacijų. Ilgiausius žiedynus turėjo dvi veislės, t. y. 'Cave-in-Rock' (40,53 cm) ir 'Trailblazer' (44,33 cm). Tirtų rykštinės soros populiacijų vidutinis lapuotumas buvo gana didelis ir siekė 40,14 %. Net 63,33 % populiacijų lapuotumas svyravo 35 – 45 % intervale. Lyginant atskirų populiacijų lapuotumą su I ir II genetinės kolekcijos vidurkiu nustatyta, kad statistiškai patikimai didžiausias lapuotumas (45 – 55 %) buvo laukinių populiacijų Nr. 38, 72, 113, 118, 119, 120, 124, 126 ir 133 bei veislės 'Dacotah'. Esminiai mažiausias lapuotumas nustatytas laukinių populiacijų Nr. 24, 26, 27, 29, 46, 47, 50, 52, 55, 60, 106 ir 107. Remiantis vidutiniais dvejų metų duomenimis vidutinis stiebų skaičius kere buvo 88,62 vnt., o 46,66 % populiacijų stiebų skaičius svyravo tarp 80 ir 100 vnt. Daugiausiai stiebų turėjo veislė 'Dacotah' (144,37 vnt.), t. y. 62,90 % daugiau nei bandymo vidurkis.

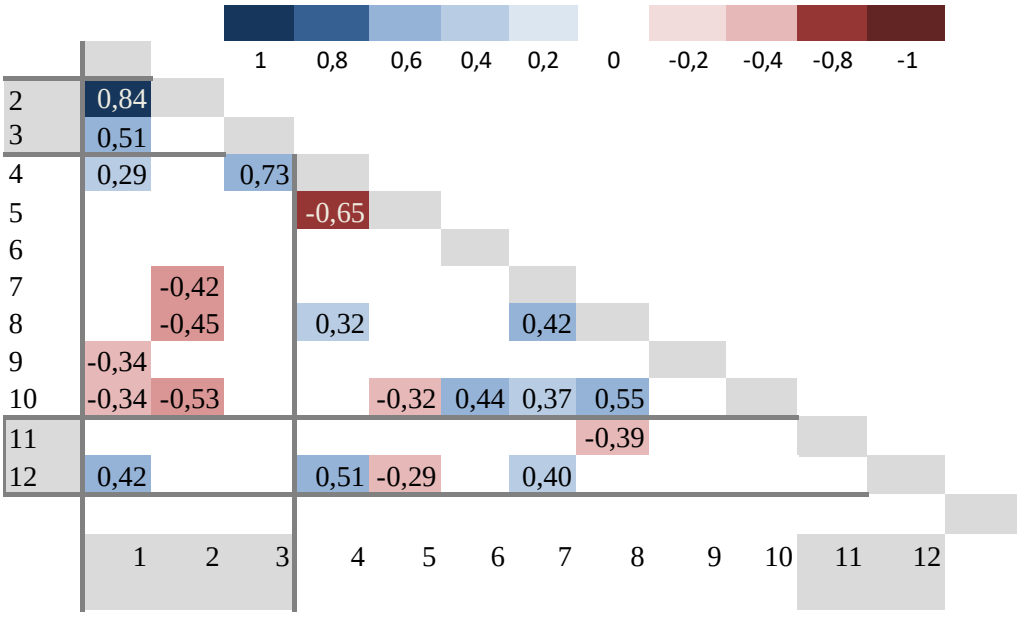
Nustatyta, kad labiausiai nepastovūs (20 % < CV > 30 %) požymiai yra generatyvinių ir vegetatyvinių stiebų skaičius kere, 1000 sėklų masė, augalo sėklų derlius bei sėklų derlius pasėlio ploto vienete. Daugiausiai generatyvinių stiebų turėjo iš Šiaurės Dakotos kilusi labai žema veislė 'Dacotah', o daugiausiai vegetatyvinių stiebų – iš Mičigano kilusi veislė 'Southlow'. Lengvesnes sėklas nei bandymo vidurkis (0,8 – 2,0 g) turėjo 58,82 % rykštinės soros populiacijų ir tik 5,88 % populiacijų – sėklos buvo sunkesnės nei 2 g (2,0 – 2,4 g).

Daugumos, t. y. 77,58 %, populiacijų augalo sėklų derlius svyravo nuo 10 iki 30 g. Esminiai didžiausią augalo sėklų derlių turėjo laukinė populiacija Nr. 113 (78,00 g).

Siekiant nustatyti sėklų derlių pasėlio ploto vienete buvo tiriamos 3 rykštinės soros veislės ir viena hibridinė populiacija. Įvertinus šių tyrimų duomenis paaiškėjo, kad vidutinis rykštinės soros sėklų derlius buvo nedidelis ir tesiekė 106,00 kg ha^{-1}. Statistiškai patikimai didžiausias sėklų derlius buvo veislės 'Dacotah' (170,42 kg ha^{-1}).

Jei augalų selekcija vykdoma vieno pasirinkto požymio keitimo kryptimi, pavyzdžiui derliaus didinimo, tai gali turėti įtakos kitiems augalo požymiams. Todėl selekcininkai yra suinteresuoti vienu metu tobulinti keletą pageidaujamų požymių. Tam reikalinga žinoti įvairių morfologinių požymių ir ūkiškai naudingų savybių priklausomumą.

Siekiant išsiaiškinti sąsajas tarp rykštinės soros morfologinių požymių ir ūkiškai naudingų savybių buvo atlikta Pirsono koreliacinė analizė (13 pav.).



13 paveikslas. Pirsono koreliacijos koeficientai tarp rykštinės soros morfologinių požymių ir ūkiškai naudingų savybių. Visos pavaizduotos koreliacijos yra statistiškai patikimos kai $p \leq 0,05$. Spalvos intensyvumas reiškia koreliacijos stiprumą tarp tiriamų požymių. 1 – stiebų skaičius kere; 2 – generatyvinių stiebų skaičius; 3 – vegetatyvinių stiebų skaičius; 4 – lapuotumas; 5 – žiedynų masė; 6 – augalo žalia biomasė; 7 – žiedyno ilgis; 8 – lapo ilgis; 9 – lapo plotis; 10 – augalo aukštis; 11 – augalo sėklų derlius; 12 – 1000 sėklų masė

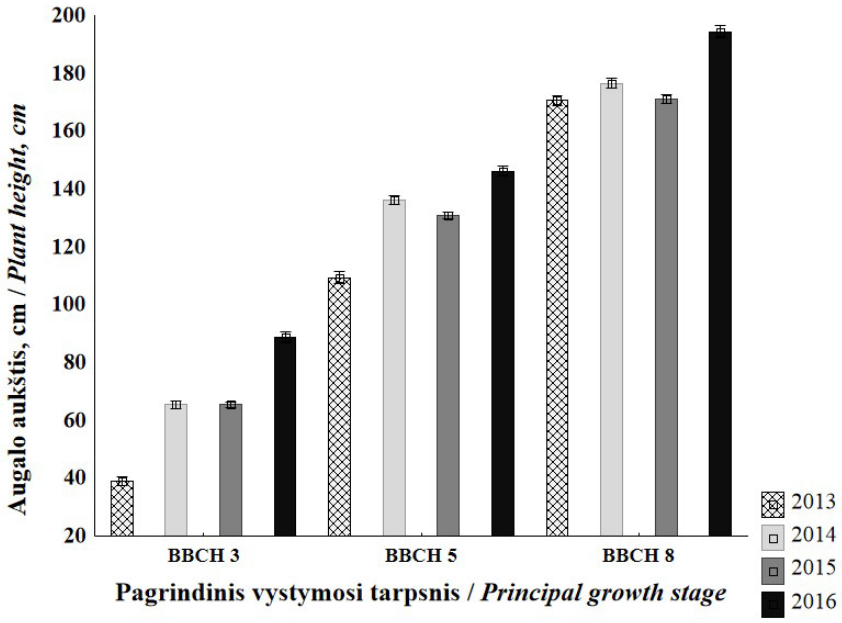
Figure 13. Pearson correlations of morphological and economically useful traits of switchgrass populations. All shown correlations are statistically significant at $p \leq 0.05$. The intensity of the color shows the strength of correlation between the traits. 1 – number of stems per bunch; 2 – number of generative stems; 3 – number of vegetative stems; 4 – leafiness; 5 – weight of inflorescences; 6 – fresh biomass per plant; 7 – length of inflorescence; 8 – length of leaf; 9 – width of leaf; 10 – height of plant; 11 – seed yield per plant; 12 – weight of 1000 seeds

Statistiškai patikimai stipriausios koreliacijos nustatytos tarp visų stiebų skaičiaus ir generatyvinių stiebų skaičiaus kere ($r = 0,84$; $p = 0,001$) bei vegetatyvinių stiebų skaičiaus ir lapų pločio ($r = 0,73$; $p = 0,001$). Augalų aukštis silpnai neigiamai koreliavo su stiebų skaičiumi ($r = -0,34$; $p = 0,019$) ir vidutiniškai neigiamai – su generatyvinių stiebų skaičiumi ($r = -0,53$; $p = 0,001$), tačiau teigiamai – su augalo žalia biomase ($r = 0,44$; $p = 0,002$) ir lapų ilgiu ($r = 0,55$; $p = 0,001$). Augalų produktyvumo rodikliai, pvz., augalo sėklų derlius silpnai neigiamai koreliavo su lapų ilgiu ($r = -0,39$, $p = 0,006$), o 1000 sėklų

masė vidutiniškai ar silpnai koreliavo su stiebų skaičiumi (r = 0,42, p = 0,003), lapuotumu (r = 0,51, p = 0,001), žiedynų ilgiu (r = 0,40, p = 0,005).

Statistiškai patikimos teigiamos, tačiau silpnos koreliacijos buvo tarp augalų lapuotumo ir lapų ilgio (r = 0,32; p = 0,026) bei stiebų skaičiaus augale (r = 0,29; p = 0,049). Esminė silpna neigiama koreliacija nustatyta tarp stiebų skaičiaus ir lapų pločio (r = -0,34; p = 0,019). Panašios tendencijos, tačiau skirtingo stiprumo koreliaciniai ryšiai publikuojami ir kitų autorių (Sripathi et al., 2013).

Literatūroje nurodoma, kad rykštinės soros morfologinių struktūrų vystymasis labai priklauso nuo efektyvių temperatūrų sumos vegetacijos metu ir varijuoja nuo augavietės sąlygų, pvz., drėgmės režimo (Nelson, Volenec, 1995; Boe, Casler, 2005). Rykštinės soros I genetinėje kolekcijoje 2013–2016 metais birželio pradžioje išmatavus laukinių populiacijų aukštį nustatyta, kad jis statistiškai patikimai priklausė nuo efektyvių temperatūrų sumos (r = 0,76; p = 0,001), o 58 % duomenų aprašančių augalų aukštį turėjo sąsajas su efektyvių temperatūrų suma. Tačiau liepos ir rugsėjo pradžioje, priklausomybės tarp augalų aukščio ir efektyvių temperatūrų sumos nebuvo. Kitų autorių išvados patvirtina, kad rykštinės soros vegetatyvinių struktūrų vystymasis iki generatyvinės brandos tiesiogiai priklauso nuo efektyvių temperatūrų sumos (Parrish, Fike, 2005; Mitchell, Schmer, 2012). Pirmais – ketvirtais derliaus metais augalų aukščio variaciją galėjo įtakoti tiek aplinkos meteorologinės sąlygos, tiek ir augalų biologinis amžius. Pirmaisiais derliaus metais (2013 m.) rykštinės soros augalai buvo žemiausi, o ketvirtais derliaus metais – aukščiausi (14 pav.). Tikėtina, kad trečiais derliaus metais (2015 m.) augalų žemesnį aukštį, ypač sėklų brandos tarpsnyje, nulėmė vasaros sausi orai ir drėgmės stoka.

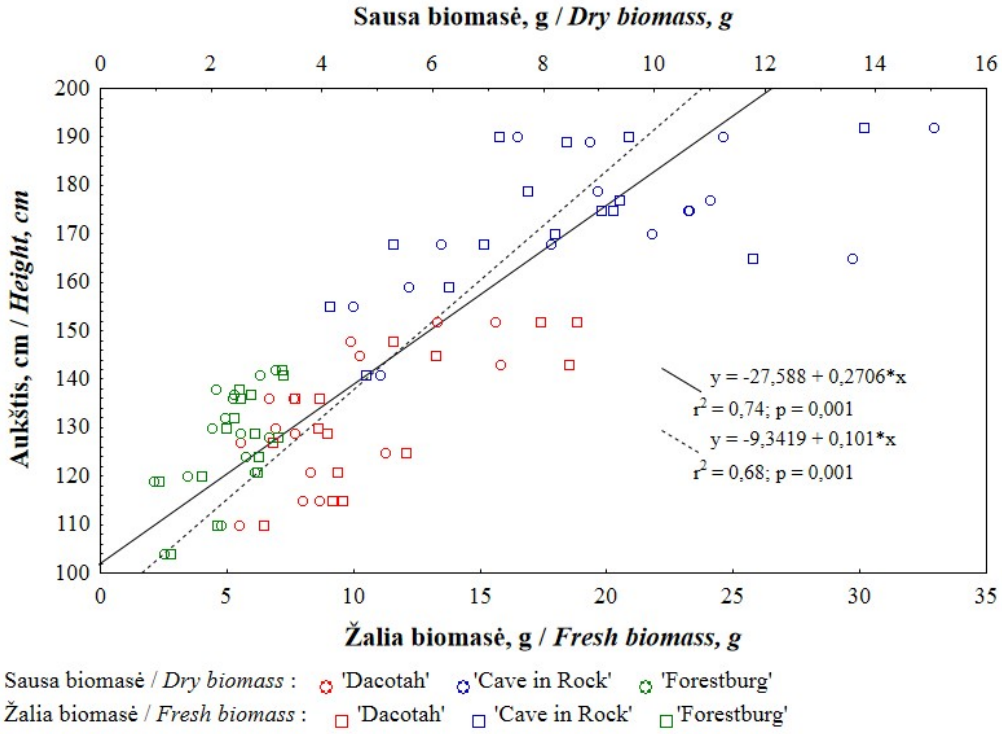


14 paveikslas. Rykštinės soros aukščio dinamika 2013 – 2016 m. Grafike pažymėtos standartinės paklaidos

Figure 14. The dynamics of switchgrass height in 2013 – 2016 year. Error bars indicate standard error of the mean

Kai kurie autoriai nurodo, kad rykštinės soros augalų aukštis tinka produktyviausių genotipų atrankai (Schmer et al., 2010; Price, Casler, 2014 a; Price, Casler, 2014 b). Tam patikrinti 2015 m. ir 2016 m. rykštinės soros sėklų brandos tarpsnyje buvo išmatuoti trijų skirtingos geografinės kilmės veislių ('Dacotah', 'Forestburg' ir 'Cave in Rock') generatyvinių ūglių aukščiai bei generatyvinių ūglių žalia ir sausa biomasė. Šių požymių priklausomumui įvertinti atlikta regresinė analizė (15 pav.).

Tyrimo rezultatai parodė, kad pirmais metais rykštinės soros generatyvinių ūglių žalia ir sausa biomasė buvo vidutiniškai įtakojama jų aukščio (r = 0,55; p = 0,001 ir r = 0,55; p = 0,001 atitinkamai) arba 30 % ūglių masės variacijos buvo nulemta dėl šių požymių priklausomybės. Antrais metais gauta daug stipresnė generatyvinių ūglių žalios bei sausos biomasės priklausomybė nuo jų aukščio, t. y. šių požymių priklausomybė nulėmė 73 % ūglių žalios biomasės variacijos bei 68 % ūglių sausos masės variacijos (15 pav.).



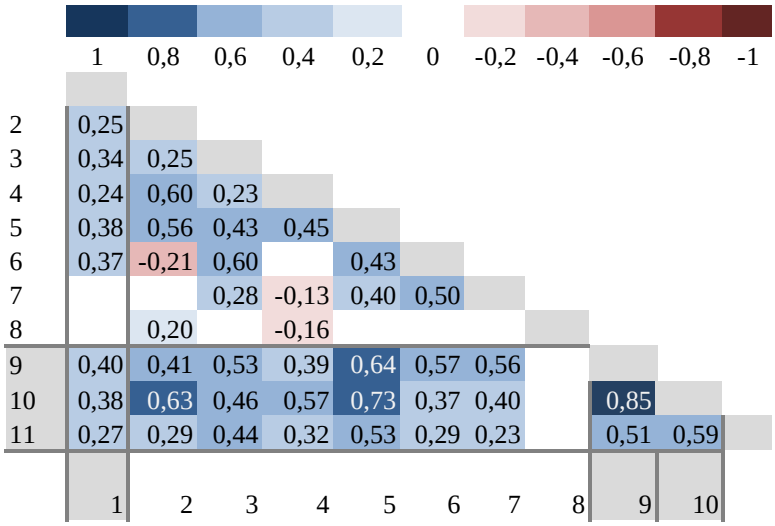
15 paveikslas. Regresinė analizė, apibūdinanti trijų rykštinės soros veislių ('Dacotah', 'Forestburg', 'Cave in Rock') generatyvinių ūglių žalios biomasės (juoda tiesi linija) ir sausos biomasės (juoda punktyrinė linija) priklausomybę nuo ūglių aukščio 2016 m.

Figure 15. The analysis of regression describing the dependence of fresh biomass (black straight line) and dry biomass (black dotted line) of generative shoots on their height of three switchgrass cultivars ('Dacotah', 'Forestburg', 'Cave in Rock') in 2016 year

Ankstyviausios veislės 'Dacotah' generatyviniai ūgliai buvo žemiausi ir lengviausi: atskirais metais ūglių aukštis kito nuo 81,33 cm (2015 m.) iki 127,40 cm (2016 m.), o jų sausa masė – nuo 2,28 g iki 2,45 g. Vėlyviausia veislė 'Cave in Rock' užaugino aukščiau-

sius ir esminiai sunkiausius generatyvinius ūglius, kurių aukštis 2015 – 2016 m. svyravo nuo 101,00 cm iki 172,86 cm, o sausa masė – nuo 8,75 g iki 8,11 g. Įdomu tai, kad kontrastingų meteorologinių sąlygų metais (2015 ir 2016 m.) skirtingų veislių generatyvinių ūglių sausa masė esmingai nekito, priešingai nei jų aukštis. Pritaikius Vilkso λ (Wilks) statistinę analizę nustatyta, kad metų meteorologinių sąlygų įtaka generatyvinų ūglių aukščiui buvo didesnė (Vilkso $\lambda = 0{,}89$, $p = 0{,}001$) nei veislės (Vilkso $\lambda = 0{,}19$, $p = 0{,}34$), o svorio skirtumai buvo labiau apspręsti veislės (Vilkso $\lambda = 0{,}27$, $p = 0{,}001$) nei metų (Vilkso $\lambda = 0{,}23$, $p = 0{,}36$). Kadangi didesnę diagnostinę vertę turėjo generatyvinių ūglių sausa masė, todėl tikėtina kad šis požymis yra tinkamas naudoti produktyviausių genotipų atrankoje.

A. Boe ir M. D. Casler (2005) nuomone, rykštinės soros produktyvumo potencialą galima išreikšti ūglių skaičiaus ploto vienete, fitomerų skaičiaus ūglyje bei fitomerų svorio kintamaisiais. Rykštinei sorai, kaip ir kitiems migliniams augalams, būdingas ryškus ūglių struktūros metameriškumas (fitomeriškumas). Ūglių struktūrinių elementų proporcijos lemia visos augalo biomasės produkciją, todėl selekcijoje siekiant ją padidinti svarbu žinoti ūglių struktūrinių elementų tarpusavio priklausomybę. Tam nustatyti buvo atlikta generatyvinių ūglių struktūrinių elementų tarpusavio koreliacinė analizė (16 pav.).



16 paveikslas. Pirsono koreliacijos koeficientai tarp rykštinės soros generatyvinių ūglių morfometrinių požymių. Visos pavaizduotos koreliacijos yra statistiškai patikimos kai $p \leq 0{,}05$. Spalvos intensyvumas reiškia koreliacijos stiprumą tarp tiriamųjų požymių. 1 – generatyvinio ūglio žalia biomasė; 2 – stiebo ilgis; 3 – žiedyno ilgis; 4 –tarpubamblių skaičius; 5 – stiebo diametras; 6 – lapo ilgis; 7 – lapo plotis; 8 – pirmo tarpubamblio ilgis; 9 – lapų masė; 10 – stiebo masė; 11 – žiedyno masė

Figure 16. Pearson correlations of morphometric traits of swichgrass generative tillers. All shown correlations are statistically significant at $p \leq 0{,}05$. The intensity of the color shows the strength of correlation between the traits. 1 – fresh biomass of tiller; 2 – length of stem; 3 – length of inflorescence; 4 – number of internodes; 5 – diameter of stem; 6 – length of leaf; 7 – width of leaf; 8 – length of first internode; 9 – weight of leaf per tiller; 10 – weight of stem per tiller; 11 – weight of inflorescence per tiller

Tyrimo duomenys parodė, kad rykštinės soros generatyvinių ūglių stiebo ilgis statistiškai patikimai koreliavo su stiebo mase (r = 0,63; p = 0,001), stiebo diametru (r = 0,56; p = 0,001), tarpubamblių skaičiumi (r = 0,60; p = 0,001). Ūglių stiebo masė buvo stipriai susijusi su stiebo diametru (r = 0,73; p = 0,001) bei vidutiniškai susijusi su žiedyno mase (r = 0,59; p = 0,001). Tai rodo, kad aukštesni ūgliai buvo storesni, turėjo daugiau tarpubamblių ir buvo sunkesni. Stiebo diametrą, kaip netiesioginį produktyvumo rodiklį, būtų galima naudoti rykštinės soros produktyviausių augalų atrankoje bei jų biomasės derliaus modeliavimui. Generatyvinių ūglių lapų masė stipriai koreliavo su ūglių stiebo mase (r = 0,85; p = 0,001) ir vidutiniškai koreliavo su stiebo diametru (r = 0,64; p = 0,001), lapų ilgiu bei pločiu (r = 0,57; r = 0,56; p = 0,001 atitinkamai). Vidutinės statistiškai patikimos koreliacijos nustatytos ir tarp žiedynų ilgio ir lapų masės (r = 0,53; p = 0,001) bei lapų ilgio (r = 0,60; p = 0,001).

Įvairių autorių požiūris apie augalų morfologinių požymių ar savybių ir ploidiškumo lygio priklausomumą yra gana nevienodas. Augalų ploidiškumas gali įtakoti jų anatomines savybes (ląstelių dydį, tūrį), fermentų koncentraciją (Otto, Whitton, 2000). M. D. Casler et al. (2005) nurodė, kad rykštinės soros skirtingo ploidiškumo populiacijas galima sugrupuoti pagal jų morfologinius požymius, tačiau D. B. Lowry et al. (2014) nuomone – nėra aiškaus ryšio tarp šios rūšies augalų fenotipinių savybių ir jų ploidiškumo. Siekiant įvertinti skirtingo ploidiškumo rykštinės soros populiacijas pagal 12 morfologinių požymių ir ūkiškai naudingų savybių buvo atlikta pagrindinių komponenčių analizė (PCA) (4 lentelė). Pagrindinių komponenčių analizė leidžia sugrupuoti duomenis daugiamatėje matricoje į diskrečius komponentus, sudarant pagrindines komponentes (PC) taip, kad kiekviena iš jų parodytų įvairovės proporciją, kuri yra nesusijusi su kitos komponentės duomenimis.

Pagrindinių komponenčių analizė parodė, kad pirmos trys komponentės paaiškina 62,66 % rykštinės soros morfologinių požymių įvairovės (4 lentelė).

Pirmoji komponentė (PC1) aprašė 30,82 % duomenų dispersijos ir atitinkamai pagal tikrines (Eigen) vektorių vertes labiausiai buvo susijusi su generatyvinių stiebų ir visų stiebų skaičiumi kere. 17 paveiksle matyti, kad ši komponentė sugrupavo oktaploidines populiacijas į dvi grupes. Populiacijų Nr. 3, 66, 78, 162, 170 augalams būdingas vėlyvesnis plaukėjimas ir didesnė biomasė, jie buvo aukštesni, ilgesniais ir platesniais lapais, turėjo mažiau stiebų, o populiacijų Nr. 169, 166, 165, 63 augalams – būdingos priešingos šių požymių vertės.

Antroji komponentė (PC2) sudarė 18,64 % visos įvairovės ir sugrupavo populiacijas pagal vegetatyvinių stiebų skaičių ir lapuotumą (4 lentelė). Šie morfologiniai požymiai atskyrė daugumą tetraplodinių populiacijų nuo oktaploidinių bei mišraus ploidiškumo populiacijų. Trečioji komponentė (PC3) sudarė 11,30 % visos įvairovės ir buvo teigiamai susijusi su augalų žydėjimo sistema, t. y. žiedynų ilgiu ir generatyvinių stiebų skaičiumi (4 lentelė).

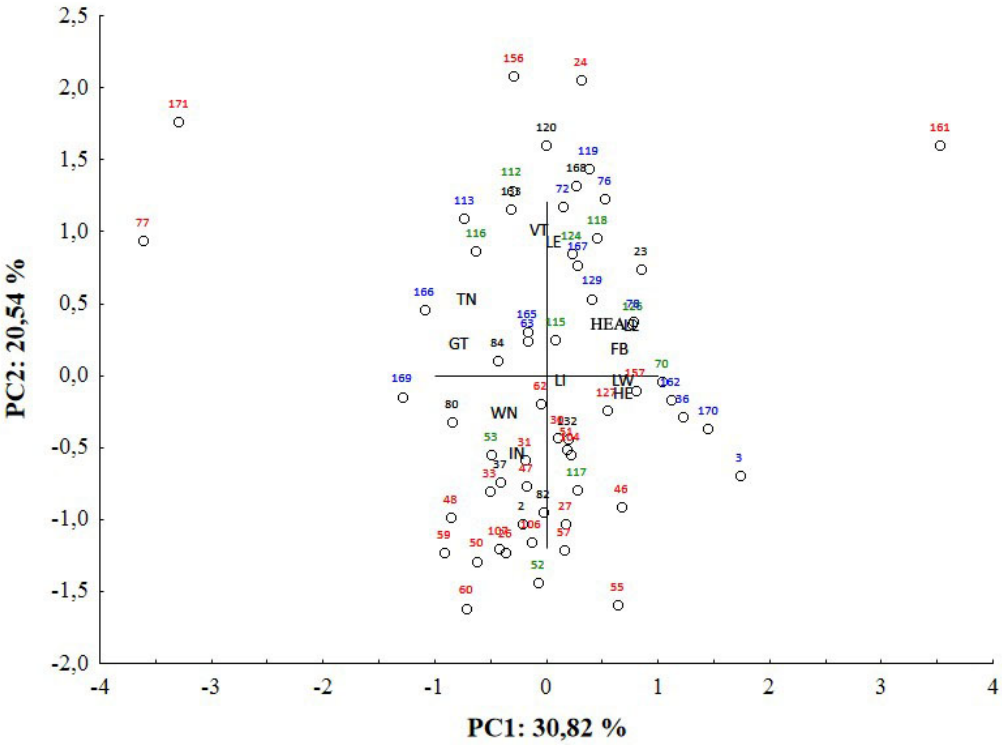
17 paveikslas parodo, kad pagal tirtus požymius dauguma tetraploidinių populiacijų, kilusių iš Šiaurės Dakotos sudarė atskirą grupę nuo oktaploidinių. Šios grupės populiacijų skaida buvo mažesnė. Joms būdingas geresnis žiemojimas ir didesnė žiedynų masė. Tačiau labiausiai nuo visų populiacijų nutolo ir į atskiras grupes atsiskyrė veislės 'Dacotah' (Nr. 171 ir 77), 'Grenville' (Nr. 156) 'Kanlow' (Nr. 161) bei laukinės populiacijos Nr. 24 ir 55.

4 lentelė. Rykštinės soros populiacijų (n = 66) tarpusavio ryšiai paremti pagrindinių komponenčių analize pagal morfologinius požymius ir ūkiškai naudingas savybes

Table 4. Basic statistics of principal component analysis for morphological and economically useful traits of switchgrass populations (n = 66)

Požymiai ***Traits***	**Požymio galia** ***Power of trait***	**Požymio reikšmingumas** ***Importance of trait***	**PC1**	**PC2**	**PC3**
Stiebų skaičius kere *Number of stems per bunch*	0,876	1	-0,375	0,253	0,380
Generatyvinių stiebų skaičius *Number of productive tillers*	0,846	2	-0,410	0,056	0,403
Vegetatyvinių stiebų skaičius *Number of vegetative tillers*	0,826	3	-0,040	0,570	0,085
Lapuotumas *Leafiness*	0,700	4	0,019	0,520	-0,132
Lapų ilgis *Length of leaf*	0,654	5	0,388	0,152	0,111
Lapų plotis *Width of leaf*	0,618	6	0,363	-0,078	0,291
Žiedynų masė *Weight of inflorescence*	0,613	7	-0,130	-0,425	0,277
Augalo žalia biomasė *Fresh biomass per plant*	0,597	8	0,346	0,024	0,365
Augalo aukštis *Plant height*	0,546	9	0,356	-0,166	-0,101
Žiedyno ilgis *Length of panicle*	0,452	10	0,067	-0,096	0,555
Plaukėjimo ankstyvumas *Day degree till heading*	0,440	11	0,302	0,161	0,171
Žiemojimas *Overwintering*	0,292	12	-0,212	-0,248	-0,1017
Tikrinė vertė / *Eigen value*			3,67	2,43	1,35
Komponenčių variantiškumas, % / *Percentages of variance explained*, %			30,82	20,54	11,30
Kauptinis variantiškumas, % / *Cumulative variance*, %			30,82	51,36	62,66

Pagrindinių komponenčių analizė atskleidė, kad pagal morfologinius požymius rykštinės soros populiacijas galima tik iš dalies sugrupuoti į tetraploidines ir oktaploidines. Ploidiškumo ir augalų fenotipo ryšį pagrįsti yra sunku, nes rykštinės soros morfologinių požymių variaciją įtakoja daug veiksnių (pvz., ekotipas, kilmė ir kt.), kurie dažnai yra neatsiejami ir persipynę. Tai patvirtina įvairių autorių tyrimai (O'Keefe et al., 2013; Lowry et al., 2014).



17 paveikslas. Rykštinės soros populiacijų (n = 66) tarpusavio ryšiai paremti pagrindinių komponenčių analize pagal morfologinius požymius ir ūkiškai naudingas savybes. Tetraploidinės populiacijos pažymėtos raudonai, oktaploidinės – mėlynai, mišraus ploidiškumo – žaliai, juodai pažymėtų populiacijų ploidiškumas nenustatytas. WN – žiemojimas, LL – lapo ilgis, LW – lapo plotis, HE – augalo aukštis, FB – žalia biomasė, TN – stiebų skaičius, GT – generatyvinių stiebų skaičius, VT – vegetatyvinių stiebų skaičius, LE – lapuotumas, LI – žiedyno ilgis, IN – žiedynų masė, HEA – plaukėjimo ankstyvumas

Figure 17. Principal component analysis of switchgrass populations (n = 66) based on morphological and economically useful traits. Red marked populations are tetraploid, blue – octoploid, green – mixed ploidy, black – ploidy not detected. WN – overwintering, LL – leaf length, LW – leaf width, HE – height, FB – fresh biomass, TN – number of stems, GT – number of generative tillers, VT – number of vegetative tillers, LE – leafiness, LI – length of inflorescence, IN – weight of inflorescence, HEA – heading earliness

Apibendrinimas. *Tyrimo rezultatai parodė, kad labiausiai varijuojantys rykštinės soros požymiai yra vegetatyvinių ir generatyvinių stiebų skaičius kere, 1000 sėklų masė, augalo sėklų derlius bei sėklų derlius pasėlio ploto vienete. Nustatyti stabiliausi rykštinės soros fenotipiniai požymiai yra augalo aukštis ir kero diametras. Statistiškai patikimos didžiausios koreliacijos nustatytos tarp visų stiebų skaičiaus ir generatyvinių stiebų skaičiaus kere, vegetatyvinių stiebų skaičiaus ir lapų pločio bei augalo lapuotumo ir žiedynų svorio. Rykštinės soros aukštis iki generatyvinės brandos buvo stipriai priklausomas nuo efektyvių temperatūrų sumos. Metų meteorologinių sąlygų įtaka generatyvinų ūglių aukščiui buvo didesnė nei veislės, o svorio skirtumai buvo labiau apspręsti veislės nei metų. Generatyvinių ūglių struktūrinių elementų tarpusavio koreliacijos analizė parodė, kad*

aukštesni ūgliai buvo storesni, turėjo daugiau tarpubamblių ir buvo sunkesni. Nustatyta, kad generatyvinių ūglių svorį ir stiebo diametrą, kaip netiesioginius produktyvumo rodiklius, būtų galima naudoti rykštinės soros augalų atrankoje bei jų biomasės derliaus modeliavimui.

Nustatyta, kad rykštinės soros morfologiniai požymiai, tokie kaip vegetatyvinių stiebų skaičius ir lapuotumas, padėjo sugrupuoti daugumą tetraplodinių populiacijų bei atskirti jas nuo oktaploidinių bei mišraus ploidiškumo populiacijų. Oktaploidinės populiacijos turėjusios mažiau stiebų, sudarė atskirą grupę, kuriai charakteringa didesnis augalų aukštis, ilgesni ir platesni lapai, vėlyvesnis plaukėjimas bei didesnė biomasė. Daugumos tetraploidinių populiacijų, kilusių iš Šiaurės Dakotos, morfologinių požymių skaida buvo mažesnė. Joms būdingas geresnis žiemojimas ir didesnė žiedynų masė.

3.2. Rykštinės soros produktyvumas ir jo kaitos dėsningumai

3.2.1. Rykštinės soros antžeminės biomasės derlius genetinėse kolekcijose

Dispersinė analizė parodė, kad rykštinės soros antžeminės žalios biomasės (toliau – ŽM) ir biomasės sausųjų medžiagų (toliau – SM) derlius esmingai priklauso nuo metų meteorologinių sąlygų, pjūties laiko bei šių veiksnių sąveikos (5 lentelė).

5 lentelė. Rykštinės soros vienos ir dviejų pjūčių žalios biomasės derliaus (ŽMD) ir sausųjų medžiagų derliaus (SMD) dispersinė analizė, 2013–2016 m.

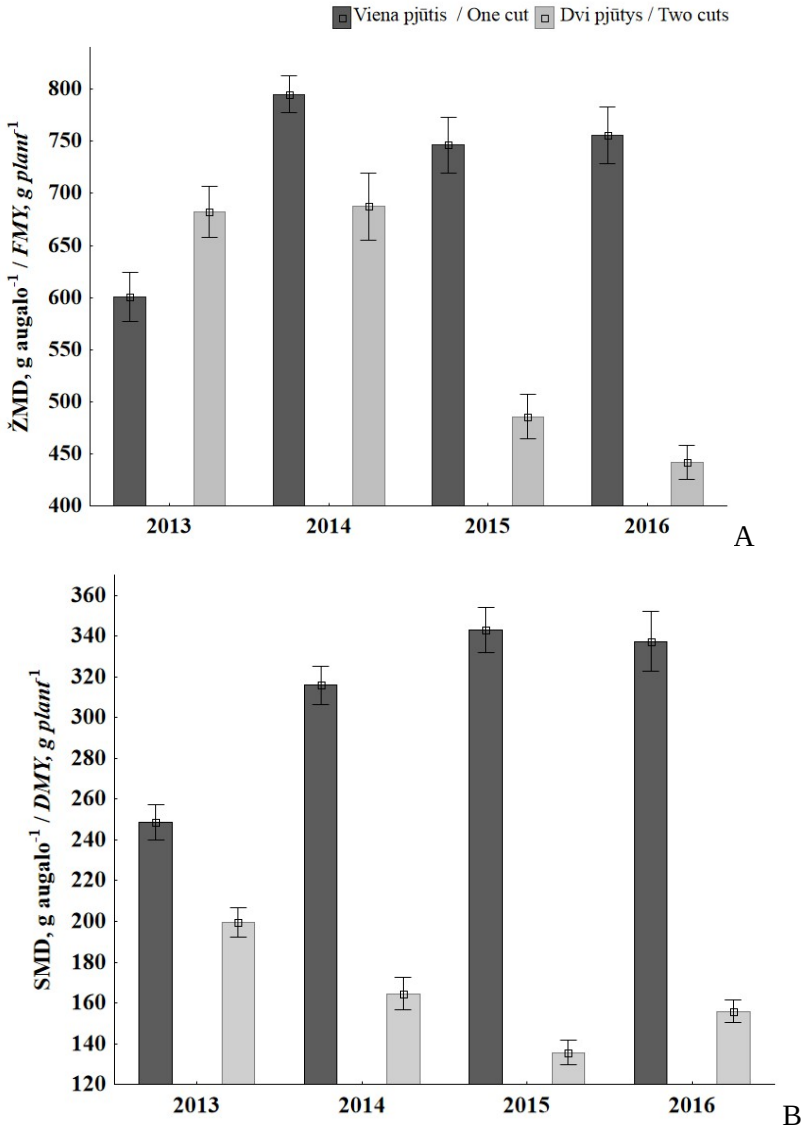
Table 5. Analysis of variance for switchgrass annual fresh matter yield (FMY) and dry matter yield (DMY) cut once and twice per season in 2013–2016

Požymis ***Trait***	**Variacijos šaltiniai** ***Source of variance***	***df***	***MS***	***F***	***p***
ŽMD *FMY*	Genotipas *Genotype*[1]	33	167592	10,86**	0,001
	Metai *Year*	3	699891	45,37**	0,001
	Pjūties laikas *Harvest time*	1	2947272	191,06**	0,001
	Metai x Genotipas *Year x Genotype*	99	18702	1,21	0,110
	Genotipas x Pjūties laikas *Genotype x Harvest time*	33	48422	3,14**	0,001
	Metai x Pjūties laikas *Year x Harvest time*	3	1151997	74,68**	0,001
	Metai x Genotipas x Pjūties laikas *Year x Genotype x Harvest time*	99	12715	0,82	0,860
SMD *DMY*	Genotipas *Genotype*[1]	33	24029	7,23**	0,001
	Metai *Year*	3	17425	5,24**	0,001
	Pjūties laikas *Harvest time*	1	2936166	884,52**	0,001
	Metai x Genotipas *Year x Genotype*	99	3095	0,93	0,650
	Genotipas x Pjūties laikas *Genotype x Harvest time*	33	7278	2,19**	0,001
	Metai x Pjūties laikas *Year x Harvest time*	3	182869	55,09**	0,001
	Metai x Genotipas x Pjūties laikas *Year x Genotype x Harvest time*	99	2116	0,63	0,990

* esminis kai p < 0,05; ** p < 0,01 / * *significant at p < 0,05; ** p < 0,01*

[1] laukinės populiacijos / *wild populations*

Palyginus vidutinius ketverių metų (2013–2016 m.) rykštinės soros ŽM ir SM derliaus duomenis nustatyta, kad esminiai didesnis derlius gautas kai augalai buvo pjaunami vieną kartą per sezoną sėklų brandos tarpsnyje (ŽM – 724,18 g augalo^{-1}; SM – 310,64 g augalo^{-1}). Pjaunant du kartus per sezoną, t. y. augalams plaukėjant ir atžėlus atolui, metinis ŽM derlius buvo 20,30 % mažesnis (576,97 g augalo^{-1}), o SM derlius – 47,30 % mažesnis (163,70 g augalo^{-1}) (18 A pav.).



18 paveikslas. Rykštinės soros antžeminės žalios biomasės derlius (ŽMD) (A) ir sausųjų medžiagų derlius (SMD) (B) pjaunant augalus vieną ir du kartus per sezoną, 2013 – 2016 m. Grafike pažymėtos standartinės paklaidos

Figure 18. Fresh matter yield (FMY) (A) and dry matter yield (DMY) (B) of switchgrass harvested once and twice per season in 2013 – 2016. Error bars indicate standard error of the mean

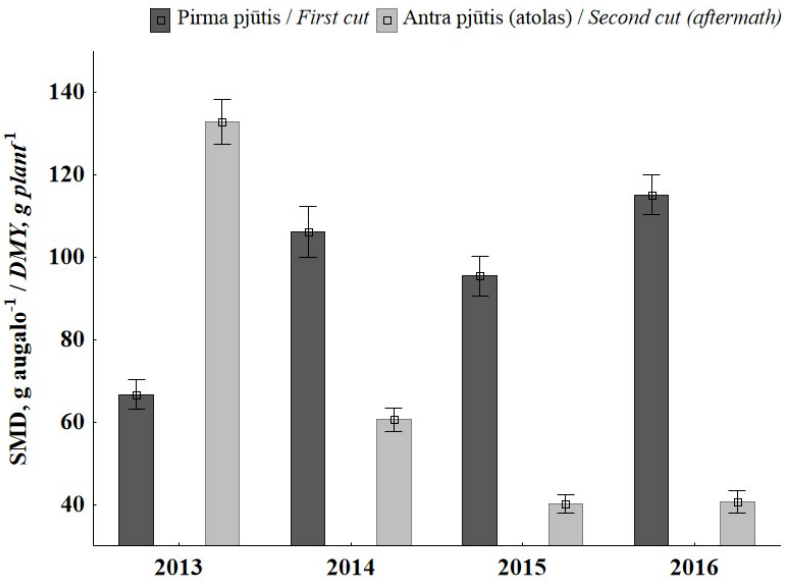
Pirmaisiais metais (2013 m.) dviejų pjūčių metinis ŽM derlius buvo 11,95 % didesnis nei vienos pjūties (18 A pav.). Tačiau vėlesniais metais dviejų pjūčių ŽM derlius buvo

esmingai mažesnis lyginant su vienos pjūties derliumi: antrais metais 10,40 % mažesnis, trečiais – 35,09 % mažesnis, ketvirtais – 43,10 % mažesnis. Šią tendenciją, kai didesnis rykštinės soros biomasės derlius gaunamas prie vienos pjūties patvirtina ir kiti autoriai (Parrish, Fike, 2005).

Vienos pjūties SM derlius visais tyrimų metais buvo esminiai didesnis nei dviejų pjūčių: pirmais metais 21,46 % didesnis, antrais – 89,31 %, trečiais – 154,40 %, ketvirtais – 122,65 % (18 B pav.). Didžiausias vienos pjūties biomasės SM derlius gautas trečiais metais (341,44 g augalo^{-1}). Jis buvo 40,75 % didesnis nei pirmais metais, tačiau esmingai nesiskyrė nuo antrų ir ketvirtų metų derliaus. Kiti autoriai (Fike et al., 2006; Alexopoulou et al., 2008) nurodo, kad rykštinės soros augalai didžiausią biomasės derlių užaugina tik 3–4 ar vėlesniais derliaus metais.

Priešinga tendencija gauta augalus nupjovus du kartus per vegetacijos sezoną. Didžiausias dviejų pjūčių SM derlius nustatytas pirmais augalų naudojimo metais (199,70 g augalo^{-1}), o antrais ir vėlesniais metais dviejų pjūčių SM derlius esmingai sumažėjo (15,93 % – 2014 m., 32,79 % – 2015 m., 23,36 % – 2016 m.) (18 B pav.). Gerokai mažesnį trečių metų (2015 m.) dviejų pjūčių SM derlių galėjo nulemti neįprastai mažas kritulių kiekis birželio ir rugpjūčio mėnesiais. D. J. Parrish ir J. H. Fike (2005) nuomone dvi pjūtys per vegetacijos sezoną mažina rykštinės soros derlių, o ilgainiui – šie derliaus nuostoliai didėja. Trys ar keturios pjūtys gali labai nualinti rykštinės soros augalus, dėl to sumažėja jų derlingumas ir ištvermingumas žiemą. Virdžinijos valstijoje (JAV) didesnis rykštinės soros derlius gautas augalus nupjovus du kartus, tačiau autoriai nurodo, kad tam būtinas optimalus drėgmės kiekis, o viena pjūtis tinkamesnė sausringais metais ar sausesnėse augavietėse (Liu et al., 2015).

Palyginus dviejų pjūčių režimo atskirų pjūčių vidutinius ketverių tyrimo metų derliaus duomenis nustatyta, kad pirmos pjūties SM derlius siekė 96,09 g augalo^{-1} ir buvo 40,95 % didesnis nei atolo (19 pav.).



19 paveikslas. Rykštinės soros biomasės sausųjų medžiagų derlius (SMD) pjaunant augalus du kartus per sezoną, 2013 – 2016 m. Grafike pažymėtos standartinės paklaidos

Figure 19. Dry matter yield (DMY) of switchgrass harvested twice per season in 2013 – 2016. Error bars indicate standard error of the mean

Nors pirmais metais pirmos pjūties SM derlius buvo net 49,89 % mažesnis nei atolo, tačiau vėlesniais metais jis esminiai lenkė atolo SM derlių. Pirmais metais augalai po pirmos pjūties atžėlė gerai ir lyginant su kitais metais, atolo SM derlius buvo esminiai didžiausias – 133,03 g augalo^{-1}. Kitais metais atolo derlius tendencingai mažėjo. Esminiai mažiausias atolo derlius gautas trečiais ir ketvirtais augalų naudojimo metais (38,89 ir 39,02 g augalo^{-1} atitinkamai).

Dispersinė analizė parodė, kad rykštinės soros ŽM ir SM derliui esminį poveikį turėjo ir genotipas (5 lentelė). Genotipo, metų meteorologinių sąlygų ir pjūties laiko sąveikos įtaka ŽM ir SM derliui buvo neesminė. Tai parodo, kad atskirų genotipų derlius skirtingais metais abejose pjūtyse buvo stabilus ir kito nežymiai.

Rykštinės soros I ir II genetinėje kolekcijoje nustatytos didžiausią biomasės SM derlių užauginusios laukinės populiacijos ir veislės (6 lentelė). I kolekcijoje augalus pjaunant vieną kartą per sezoną produktyviausios buvo penkios laukinės populiacijos: Nr. 106, 115, 117, 118 ir 124. Visos jos kilusios iš Šiaurės Dakotos. Remiantis vidutiniais ketverių metų duomenimis nustatyta, kad šių populiacijų vienos pjūties SM derlius buvo nuo 11,63 % iki 45,25 % didesnis lyginant su kolekcijos vidurkiu. Atrinktos laukinės populiacijos galėtų būti tinkamos kietojo biokuro gamybai.

6 lentelė. Perspektyviausių rykštinės soros laukinių populiacijų ir veislių sausųjų medžiagų derlius (SMD). I kolekcijoje pateikti 2013–2016 m., o II kolekcijoje 2015–2016 m. SMD vidurkiai. Populiacijų numeriai pateikti pagal LAMMC ŽI katalogą

Table 6. Means of annual dry matter yield (DMY) of high-yielding wild populations and cultivars of switchgrass. The collection I presents DMY averages in 2013–2016 years and collections II presents DMY averages in 2015–2016 years. The numbers of accessions are presented according to catalogue of LAMMC Institute of agriculture

Populiacijos nr. / *Accession No*		**SMD, g augalo^{-1} *DMY, g plant^{-1}***	
		Viena pjūtis / *Cut once*	**Dvi pjūtys / *Cut twice***
I Kolekcija, n=33 *Collections I, n=33*	57	314,52	207,85**
	106	366,12*	184,12
	115	378,96*	201,77**
	116	305,49	193,10*
	117	401,56**	186,62
	118	457,05**	226,01**
	124	379,18*	148,24
	130	288,86	201,96**
	131	281,17	195,16*
I Kolekcijos vid. / *Average of trial*		314,67	166,82
LSD$_{05}$ / LSD$_{01}$		51,19 / 67,64	24,52 / 32,44
II Kolekcija, n=60 *Collections II, n=60*	23	281,55**	-
	46	287,67**	-
	'Forestburg'	254,65*	-
	'Cave in Rock'	347,53**	-
II Kolekcijos vid. / *Average of trial*		214,06	-
LSD$_{05}$ / LSD$_{01}$		37,49 / 49,37	-

* esminiai skirtumai nustatyti lyginant su bandymo SMD vidurkiu; esminis kai $p < 0,05$; ** $p < 0,01$ / *significant differences calculated over general mean DMY of the entire trial; * significant at $p < 0,05$; ** $p < 0,01$.* - netirta / *not studied*

Pirmoje genetinėje kolekcijoje augalus pjaunant du kartus per sezoną esminiai didžiausias metinis SM derlius buvo 6 laukinių populiacijų: Nr. 57, 115, 116, 118, 130 ir

131. Visos minėtos populiacijos taip pat kilusios iš Šiaurės Dakotos. Pagal vidutinius ketverių metų duomenis nustatyta, kad šių populiacijų dviejų pjūčių metinis SM derlius buvo nuo 15,75 % iki 35,48 % didesnis lyginant su kolekcijos vidurkiu. Atrinktos laukinės populiacijos labiau tiktų biodujų gamybai.

Antroje genetinėje kolekcijoje didžiausias vienos pjūties SM derlius buvo laukinių populiacijų Nr. 23 ir 46 kilusių iš Šiaurės Dakotos ir veislių 'Forestburg' bei 'Cave in Rock'. Remiantis vidutiniais dvejų metų duomenimis nustatyta, kad šių laukinių populiacijų vienos pjūties SM derlius buvo 31,52 % ir 34,38 % didesnis nei bendras II kolekcijos vidurkis, o veislių 'Forestburg' ir 'Cave in Rock' – 18,96 % ir 62,35 % didesnis. Atrinktos populiacijos galėtų būti tinkamos kietojo biokuro gamybai.

Perspektyviausių (pagal SM derlių) laukinių populiacijų ir veislių pagrindinių agrobiologinių požymių vertės nurodytos 7 lentelėje.

7 lentelė. Produktyviausių rykštinės soros laukinių populiacijų ir veislių pagrindinių agrobiologinių požymių vertės. AU – aukštis (cm), SS – stiebų skaičius (vnt.), GS – generatyvinių stiebų skaičius (vnt.), LA – lapuotumas (%), KF – kero forma (balai[1]), SP – augalų spalva (balai[2])

Table 7. The values of the basic agrobiological traits of high yielding wild populations and cultivars of switchgrass. AU – height (cm), SS – tillers per plant (units), GS – productive tillers per plant (units) , LA – leafiness (%), KF – bunch habit (point[1]), SP – plant color (point[2])

Populiacijos nr. / *Accession No*	**AU**	**SS**	**GS**	**LA**	**KF**	**SP**
	Vidurkis / Average Standartinis nuokrypis / *Standard deviation*					
23	183,64 *43,54*	86,75 *20,16*	70,12 *13,51*	43,67 *4,12*	1	2
46	174,91 *38,46*	72,00 *23,26*	63,62 *20,81*	43,57 *9,35*	1	2
57	174,81 *9,23*	84,75 *34,29*	79,63 *30,58*	35,72 *0,37*	3	2
106	187,20 *18,57*	73,75 *5,30*	64,00 *0,35*	35,26 *0,32*	3	2
115	186,06 *14,82*	92,00 *28,64*	75,00 *17,32*	40,09 *0,52*	3	2
116	187,36 *20,19*	116,00 *28,99*	91,50 *14,50*	39,42 *0,02*	3	1
117	196,22 *15,00*	68,00 *5,66*	61,75 *1,77*	39,79 *0,37*	1	3
118	183,02 *16,35*	90,63 *45,79*	68,50 *23,33*	46,16 *0,05*	3	3
124	179,33 *18,15*	80,13 *38,71*	62,38 *23,51*	48,07 *0,31*	3	2
130	192,62 *21,87*	78,00 *41,37*	70,63 *33,41*	36,92 0,65	3	1
131	187,61 *28,13*	75,80 *20,57*	65,00 *19,18*	41,09 *3,48*	3	2
'Forestburg'	147,36 *36,37*	110,00 *33,94*	95,50 *33,59*	37,20 *0,68*	3	2
'Cave in Rock'	183,20 *38,71*	101,45 *23,97*	90,38 *29,17*	37,03 *0,12*	1	2
Vidurkis *Average*	**181,80**	**86,87**	**73,69**	**40,31**	**3**[1]	**2**[1]

[3] – mediana / *median*

I kolekcijoje labai produktyvi abiejose pjūtyse buvo laukinė populiacija Nr.118, kilusi iš Šiaurės Dakotos (20 pav.). Didžioji dauguma šios populiacijos augalų buvo labai aukšti, melsvai žalios spalvos, stambiais stiebais ir lapais, labai gerai žiemojo ir buvo vidutinio ankstyvumo. Vidutiniai dvejų metų duomenys parodė, kad šios populiacijos augalų aukštis siekė 183,02 cm, stiebų skaičius kere buvo 90,63 vnt., generatyvinių stiebų skaičius – 68,50 vnt., lapuotumas – 46,16 %, kero forma – pusiau stati, o augalų spalva – melsvai žalia (7 lentelė).

A

B

20 paveikslas. A – melsvai žalios spalvos rykštinės soros laukinė populiacija Nr. 118. B – rykštinės soros veislė 'Cave in Rock'

Figure 20. A – the wild population with bluish green color No.118. B – the cultivar 'Cave in Rock'

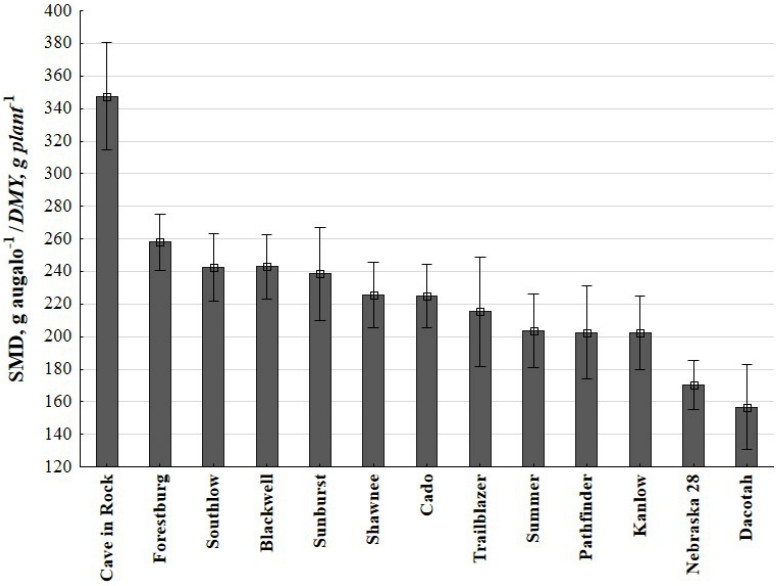
Literatūroje nurodoma, kad gamtoje egzistuoja du rykštinės soros ekotipai (Šiaurės Amerikos aukštumų ir žemumų), tačiau randamos ir tarpinės (hibridinės) formos. Žemumų ekotipo augalai yra vėlyvi, labai aukšti, melsvai žalios spalvos stambiais stiebais ir lapais, prasčiau žiemojantys. Aukštumų ekotipo augalai yra vidutinio aukščio, ryškiai žalios spalvos, ankstyvi. Kadangi aukštumų ekotipai yra natūraliai paplitę šiauriniuose rūšies

arealo regionuose, jie yra ištvermingi žiemą (Casler et al., 2012). Tikėtina, kad laukinė populiacija Nr. 118 pagal daugelį požymių buvo tarpinio tipo. Hibridinę šios populiacijos prigimtį patvirtina ir ploidiškumo tyrimai (1 priedas).

Remiantis vidutiniais ketverių metų duomenimis nustatyta, kad I kolekcijoje laukinė populiacija Nr. 117 buvo antra pagal derlingumą. Fenotipiškai ji taip pat yra tarpinio tipo tarp aukštumų ir žemumų ekotipų. Šios populiacijos augalai buvo melsvai žalios spalvos, labai aukšti (196,22 cm), labai stačiais, vidutinio pločio kerais, kuriuose formavo nedaug stiebų (stiebų skaičius kere – 68,00 vnt., generatyvinių stiebų skaičius – 61,75 vnt.). Populiacijos augalai buvo vidutiniškai lapuoti (39,79 %) (7 lentelė).

Vidutiniai dvejų metų duomenys parodė, kad II kolekcijoje derlingiausia buvo veislė 'Cave in Rock', kilusi iš Ilinojaus (6 lentelė, 20 pav.). Šios veislės augalai Lietuvoje buvo vėlyvi, aukšti (183,20 cm), plataus ir stataus kero, kuriame formavo labai daug produktyvių stiebų (stiebų skaičius kere – 101,45 vnt., generatyvinių stiebų skaičius – 90,38 vnt.), tačiau jie buvo mažiau lapuoti (37,03 %) (7 lentelė). Veislei būdinga melsvai žalia augalų spalva. Elbersen et al. (2001) nuomone veislė 'Cave in Rock' gali būti hibridinės kilmės (tarp aukštumų ir žemumų ekotipų).

21 paveiksle pavaizduotas II kolekcijoje peržiemojusių rykštinės soros veislių vidutinis dvejų metų SM derlius. Daugumos veislių, išsyrus 'Cave in Rock', SM derlius tyrimo metais buvo panašus. Mažiausias SM derlius nustatytas veislių 'Nebraska 28' (170,14 g augalo^{-1}) ir 'Dacotah' (181,67 g augalo^{-1}), tačiau jis esminiai nesiskyrė nuo veislių 'Trailblazer', 'Summer', 'Pathfinder' ir 'Kanlow' derliaus. Kiek didesnis SM derlius buvo veislių 'Cado', 'Shawnee', 'Sunburst', 'Blackwell', 'Southlow', kuris svyravo nuo 242,50 g augalo^{-1} iki 224,69 g augalo^{-1}.



21 paveikslas. Rykštinės soros veislių biomasės sausųjų medžiagų derlius (SMD), pjaunant augalus vieną kartą per sezoną, 2015–2016 m. Grafike pažymėtos standartinės paklaidos

Figure 21. Dry matter yield (DMY) of switchgrass cultivars cut once per season in 2015–2016. Error bars indicate standard error of the mean

Apibendrinimas. *Vidutiniai ketverių metų rykštinės soros derliaus duomenys parodė, kad esminiai didesnis ŽM ir SM derlius gautas augalus nupjovus vieną kartą per sezoną (ŽM – 724,18 g augalo^{-1}; SM – 310,64 g augalo^{-1}). Vienos pjūties SM derlius visais tyrimų metais buvo esminiai didesnis nei dviejų pjūčių: pirmais žolių naudojimo metais 21,46 %, antrais – 89,31 %, trečiais – 154,40 %, ketvirtais – 122,65 % didesnis.*

Vidutiniai ketverių metų derliaus duomenys parodė, kad dviejų pjūčių metinis ŽM derlius buvo 20,30 % mažesnis, o SM derlius – 47,30 % mažesnis nei derlius gautas pjaunant vieną kartą per sezoną. Didžiausias metinis dviejų pjūčių SM derlius nustatytas pirmais augalų naudojimo metais (199,70 g augalo^{-1}). Antrais ir vėlesniais metais metinis dviejų pjūčių SM derlius buvo esmingai mažesnis (15,93 % – 2014 m., 32,79 % – 2015 m., 23,36 % – 2016 m.).

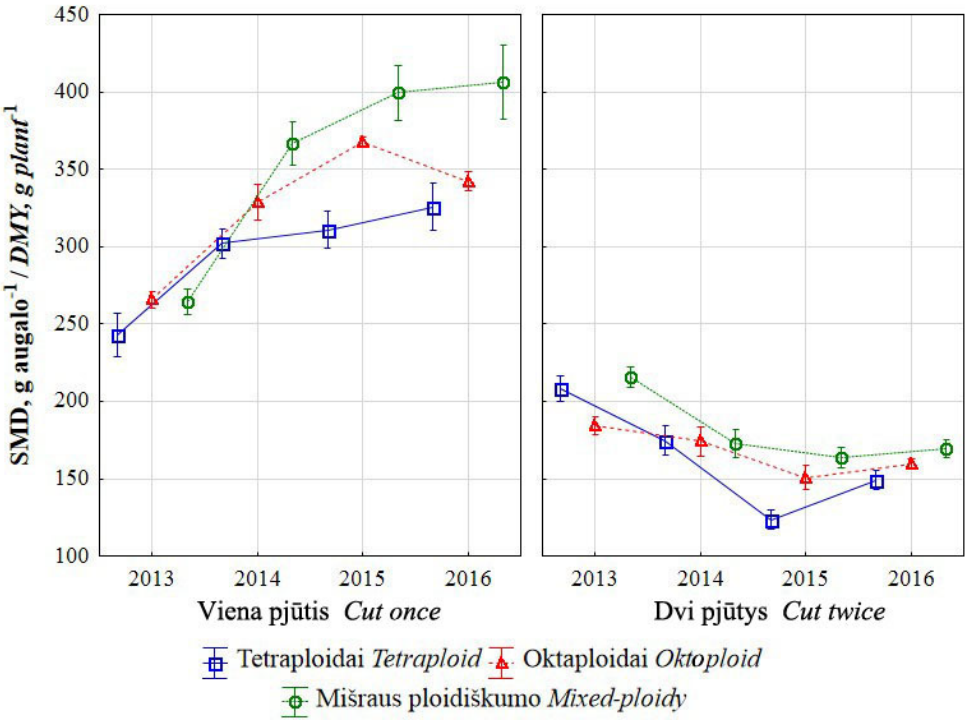
I kolekcijoje augalus pjaunant vieną kartą per sezoną, produktyviausios buvo laukinės populiacijos Nr. 106, 115, 117, 118 ir 124 o pjaunant du kartus per sezoną – laukinės populiacijos Nr. 57, 115, 116, 118, 130 ir 131. Visos minėtos laukinės populiacijos yra kilusios iš Šiaurės Dakotos. II kolekcijoje didžiausias vienos pjūties SM derlius buvo laukinių populiacijų Nr. 23 ir 46 kilusių iš Šiaurės Dakotos bei veislių 'Forestburg' ir 'Cave in Rock'.

Atrinktas produktyviausias rykštinės soros laukines populiacijas bei veisles būtų galima panaudoti, kaip vertingus genų donorus, naujų, vietos sąlygomis adaptyvių, bioenerginių veislių kūrimui. Tačiau prieš pasiūlant naujas veisles šalies bioenergetikos pramonei būtina įvertinti šios rūšies augalų poveikį vietinėms ekosistemoms.

3.2.2. Rykštinės soros skirtingo ploidiškumo populiacijų produktyvumas

Skirtingo ploidiškumo rykštinės soros laukinės populiacijos (tetraploidinės, oktaploidinės ir mišraus ploidiškumo) dvejus metus buvo pjaunamos vieną ir du kartus per sezoną. Išanalizavus duomenis dispersinės analizės metodu nustatyta, kad rykštinės soros SM derliui esminį poveikį turėjo ne tik metų meteorologinės sąlygos ($F_{fakt.}$ = 13,44; p = 0,001), pjūčių kiekis ($F_{fakt.}$ = 1182,72; p = 0,001), bet ir populiacijų ploidiškumas ($F_{fakt.}$ = 22,56; p = 0,001). Taip pat nustatyta esminė šių veiksnių sąveikos įtaka populiacijų SM derliui.

Pirmais derliaus metais augalus pjaunant vieną katrą per sezoną, esminių SM derliaus skirtumų tarp skirtingo ploidiškumo populiacijų grupių nebuvo (22 pav.). Tačiau, antraisiais ir vėlesniais metais derliaus skirtumai tarp skirtingo ploidiškumo grupių buvo ryškūs ir kiekvienais metais vis didėjo. Antrais – ketvirtais metais mišraus ploidiškumo populiacijų vienos pjūties SM derlius buvo esminiai didžiausias ir vidutiniškai siekė 390,74 g augalo^{-1}. Minėtu laikotarpiu mišraus ploidiškumo populiacijų grupė buvo nuo 8,63 % iki 18,80 % produktyvesnė nei oktaploidinių populiacijų grupė ir nuo 21,33 % iki 28,45 % – nei tetraploidinių populiacijų grupė.



22 paveikslas. Rykštinės soros skirtingo ploidiškumo laukinių populiacijų biomasės sausųjų medžiagų derlius (SMD) pjaunant augalus vieną ir du kartus per sezoną, 2013 – 2016 m. Grafike pažymėtos standartinės paklaidos

Figure 22. Dry matter yield (DMY) of switchgrass wild populations differing in ploidy level when cut once and twice per season in 2013 – 2016 year. Error bars indicate standard error of the mean

Išanalizavus atskirų metų vienos pjūties SM derliaus duomenis nustatyta, kad mišraus ploidiškumo populiacijų esminiai mažiausias SM derlius buvo gautas pirmais metais (264,48 g augalo^{-1}), o vėlesniais metais – derlius išaugo nuo 38,53 % iki 53,67 % (22 pav.). Antrais – ketvirtais metais mišraus ploidiškumo populiacijų SM derlius buvo panašus ir tarpusavyje esminiai nesiskyrė. Panaši tendencija nustatyta ir lyginant tetraploidinių populiacijų skirtingų metų biomasės SM derlių. Oktaploidinės populiacijos esminiai didžiausią biomasės SM derlių užaugino trečiaisiais metais (367,63 g augalo^{-1}), kuris buvo 38,40 % didesnis nei pirmais, 11,83 % – nei antrais ir 7,45 % – nei ketvirtais metais. Įdomu tai, kad trečių derliaus metų (2015 m.) vegetacijos sezonas charakterizuojamas itin mažu kritulių kiekiu ir didele vasaros sausra. Šie rezultatai leidžia daryti prielaidą, kad poliploidinės rykštinės soros populiacijos turi platesnę ekologinę toleranciją bei yra plastiškesnės stresinėmis sąlygomis.

Pirmais derliaus metais nupjovus augalus du kartus per sezoną tetraploidinių ir mišraus ploidiškumo populiacijų SM derlius (215,80 g augalo^{-1}) buvo 16 – 17 % didesnis nei oktoploidinių (22 pav.). Antrais metais esminių SM derliaus skirtumų tarp ploidiškumo grupių nenustatyta. Trečiais metais SM derlius visose ploidiškumo grupėse esminiai sumažėjo. Tai galėjo nulemti neįprastos tų metų aplinkos meteorologinės sąlygos bei sumažėjęs augalų gajumas dėl kasmetinio dviejų pjūčių režimo. Nepaisant to, oktoploidinių ir mišraus ploidiškumo populiacijų SM derlius 2015 m. buvo statistiškai patikimai didesnis lyginant su tetraploidinių populiacijų derliumi.

J. H. Fike et al. (2006) nuomone rykštinės soros derlingumas yra susijęs su kritulių kiekiu vegetacijos sezono metu. Tai patvirtina ir šio tyrimo duomenys. Trečių derliaus metų vegetacijos sezonas buvo labai sausas, o drėgmės atsargos žemės ūkio augalams buvo kritinės. Vasarą krituliai buvo reti ir negausūs. Esant vėjuotiems orams drėgmė iš dirvos kaipmat išgaruodavo. Rugpjūčio mėnesį trumpai palijo tik keletą kartų, o HTK tesiekė 0,1 (norma 1,4). Moksliniu požiūriu tokios aplinkos sąlygos sudarė galimybę atrinkti atspariausias sausrai populiacijas. Mišraus ploidiškumo ir oktaploidinių populiacijų didesnis produktyvumas 2015 m. gali atspindėti jų geresnį prisitaikymą nepalankiomis aplinkos sąlygomis. Manoma, kad poliploidija padidina augalų populiacijose heterozigotiškumą ir sukuria prielaidas geresnei rūšies adaptacijai, t. y., padidina jos prisitaikymą platesniam ekologinių sąlygų diapazonui (Stebbins, 1985; Otto, Whitton, 2000; Parisod et al., 2010). D. A. Warner et al. (1987) nustatė, kad poliploidija įtakoja ir fiziologinius procesus, tokius kaip fotosintezė. Todėl skirtingo ploidiškumo augalai gali nevienodai reaguoti į įvairias aplinkos sąlygas (Ohri, 2005; Knight et al., 2005).

Išanalizavus ketverių metų duomenis kiekvienoje ploidiškumo grupėje buvo atrinktos produktyviausios rykštinės soros laukinės populiacijos (8 lentelė).

8 lentelė. Rykštinės soros produktyviausių tetraploidinių, oktaploidinių ir mišraus ploidiškumo laukinių populiacijų sausųjų medžiagų derlius (SMD), 2013–2016 m. Populiacijų numeriai pateikti pagal LAMMC ŽI katalogą

Table 8. Dry matter yield (DMY) of best performing switchgrass wild populations differing in ploidy level when cut once and twice per season in 2013–2016 year. The numbers of accessions are presented according to catalogue of LAMMC Institute of agriculture

Viena pjūtis / *Cut once*		Dvi pjūtys / *Cut twice*	
Populiacijos nr. *Accession No*	SMD, g augalo^{-1} *DMY, g plant^{-1}*	Populiacijos nr. *Accession No*	SMD, g augalo^{-1} *DMY, g plant^{-1}*
Tetraploidai / *Tetraploid*			
26	351,28*	57	207,85**
106	366,12**	130	201,96**
Grupės vid. n=17 *Average of trial*	296,54	Grupės vid. n=17 *Average of trial*	163,76
LSD_{05}/LSD_{01}	46,18/61,30	LSD_{05}/LSD_{01}	27,13/36,01
Oktaploidai / *Octoploid*			
113	357,64^{ns}	113	186,72^{ns}
129	323,64^{ns}	114	179,92^{ns}
Grupės vid. n=4 *Average of trial*	326,02	Grupės vid. n=4 *Average of trial*	167,18
LSD_{05}/LSD_{01}	44,38/61,36	LSD_{05}/LSD_{01}	22,56/31,20
Mišraus ploidiškumo / *Mixed-ploidy*			
118	457,05**	118	226,01**
117	401,56 ^{ns}	115	201,77 ^{ns}
Grupės vid. n=8 *Average of trial*	356,73	Grupės vid. n=8 *Average of trial*	180,44
LSD_{05}/LSD_{01}	58,32/78,46	LSD_{05}/LSD_{01}	27,27/36,69

* esminis kai $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; ^{ns} esminio skirtumo nėra / * *significant at $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; ^{ns} no significant differences*

Tetraploidų grupėje produktyviausios buvo laukinės populiacijos Nr. 26 ir Nr. 106. Jų SM derlius pjaunant augalus vieną kartą per sezoną buvo 18,45 % ir 23,46 % didesnis nei grupės vidurkis. Pjaunant augalus du kartus tarp tetraploidų esminiai produktyviausios buvo populiacijos Nr. 103 ir Nr. 57. Jų SM derlius buvo 23,32 % ir 26,92 % didesnis nei grupės vidurkis. Oktaploidinių populiacijų grupėje esminių SM derliaus skirtumų abejose pjūtyse nenustatyta. Augalus pjaunant vieną kartą per sezoną nežymiai didesnis derlius buvo populiacijų Nr. 113 ir Nr. 129, o nupjovus du kartus – populiacijų Nr. 113 ir Nr. 114. Mišraus ploidiškumo grupėje abejose pjūtyse esminiai didžiausiu SM derliumi išsiskyrė laukinė populiacija Nr. 118. Šios populiacijos vienos pjūties derlius buvo 28,12 % didesnis nei grupės vidurkis, o dviejų pjūčių – 25,25 % didesnis nei grupės vidurkis.

Apibendrinimas. *Skirtingo ploidiškumo rykštinės soros populiacijos statistiškai patikimai skyrėsi pagal biomasės SM derlių. Pirmais metais augalus nupjovus vieną kartą per sezoną SM derlius skirtingose ploidiškumo grupėse buvo panašus. Tačiau antrais ir vėlesniais metais SM derlius tarp grupių esminiai skyrėsi, o skirtumas kasmet vis didėjo. Mišraus ploidiškumo populiacijos esminiai didžiausią biomasės SM derlių užaugino trečiais ir ketvirtais metais (399,38 – 406,45 g augalo^{-1} atitinkamai), o oktaploidinės populiacijos – trečiaisiais metais (367,63 g augalo^{-1}). Tetraploidinių populiacijų SM derlius antrais ir ketvirtais metais tarpusavyje esminiai nesiskyrė.*

Pjaunant augalus du kartus per sezoną visose ploidiškumo grupėse nustatytas esminis SM derliaus sumažėjimas, kuris buvo didžiausias sausringiausiais trečiaisiais metais. Tačiau ir esant drėgmės stygiui oktoploidinių ir mišraus ploidiškumo populiacijų derlius buvo esminiai didesnis (150,72 – 163,58 g augalo^{-1} atitinkamai) nei tetraploidinių populiacijų. Tai parodo didesnio ploidiškumo populiacijų platesnę ekologinę toleranciją bei plastiškumą stresinėmis sąlygomis.

Vidutiniais ketverių derliaus metų duomenimis nustatyta, kad tarp tetraploidų produktyviausios buvo populiacijos Nr. 26 ir Nr. 106 (vienos pjūties režime) bei Nr. 57 ir Nr. 103 (dviejų pjūčių režime). Mišraus ploidiškumo grupėje abejose pjūtyse esminiai didžiausias SM derlius buvo laukinės populiacijos Nr. 118.

3.2.3. Rykštinės soros produktyvumas pasėlyje

Selekciniuose augynuose augalus pasodinus lizdiniu būdu tarp jų labai sumažinamas konkurencinis fonas. Todėl vertinant augalų derlingumą prarandama galimybė atsižvelgti į augalų konkurencines ypatybes, dėl kurių biomasės derlius pasėlyje būna gerokai mažesnis. Bioenerginių augalų selekcininkai rekomenduoja biomasės derlių pasėliuose laikyti atskiru, labai svarbiu atrankos požymiu, nepriklausomu nuo augynuose gauto derliaus (Casler, Ramstein, 2017). Siekiant išsiaiškinti rykštinės soros augalų produktyvumą pasėlyje 2014 metais buvo pasėtos trys rykštinės soros veislės ('Dacotah', 'Forestburg' ir 'Cave in Rock') bei viena hibridinė populiacija. Pasėliuose biomasės derliui įvertinti augalai buvo pjaunami vieną kartą, tačiau skirtingais laikotarpiais: liepos, rugpjūčio ir spalio mėnesiais, žiemos pradžioje bei po žiemos ankstyvą pavasarį. Literatūroje rekomenduojama, kad geriausias laikas nupjauti energinius augalus yra vėlyvas ruduo arba ankstyvas pavasaris, nes tada augalai yra labiausiai išdžiuvę ir turi mažiausią biomasės santykinį drėgnį (Jasinskas, Liubarskis, 2003). Tačiau pavasarį tikėtini didesni biomasės derliaus nuostoliai. Koks yra rykštinės soros auginamos pasėliuose biomasės derlius Europos nemoralinės zonos sąlygomis bei kokie galimi derliaus nuostoliai pasėlius pjaunant žiemą ar pavasarį duomenų literatūroje nėra.

Dispersinė analizė parodė, kad pasėliuose rykštinės soros biomasės SM derlius esmingai priklauso nuo metų sąlygų, pjūties laiko ir genotipo įtakos (9 lentelė). Taip pat nustatyta metų sąlygų ir pjūties laiko sąveikos esminė įtaka SM derliui.

9 lentelė. Rykštinės soros skirtingų pjūčių biomasės sausųjų medžiagų derliaus dispersinė analizė, 2015–2016 m.

Table 9. Analysis of variance for dry matter yield of switchgrass harvested at different time per season in 2015–2016

Variacijos šaltiniai ***Source of variance***	***df***	***MS***	***F***	***p***
Genotipas *Genotype*[1]	3	36,20	30,57**	0,001
Metai *Year*	1	86,42	72,98**	0,001
Harvest time	4	48,77	41,18**	0,001
Metai x Genotipas *Year x Genotype*	3	2,99	2,53	0,059
Genotipas x Pjūties laikas *Genotype x Harvest time*	12	1,61	1,36	0,187
Metai x Pjūties laikas *Year x Harvest time*	4	3,90	3,29*	0,012
Metai x Genotipas x Pjūties laikas *Year x Genotype x Harvest time*	12	0,94	0,79	0,654

* esminis kai p < 0,05; ** p < 0,01 / * *significant at p < 0,05; ** p < 0,01*

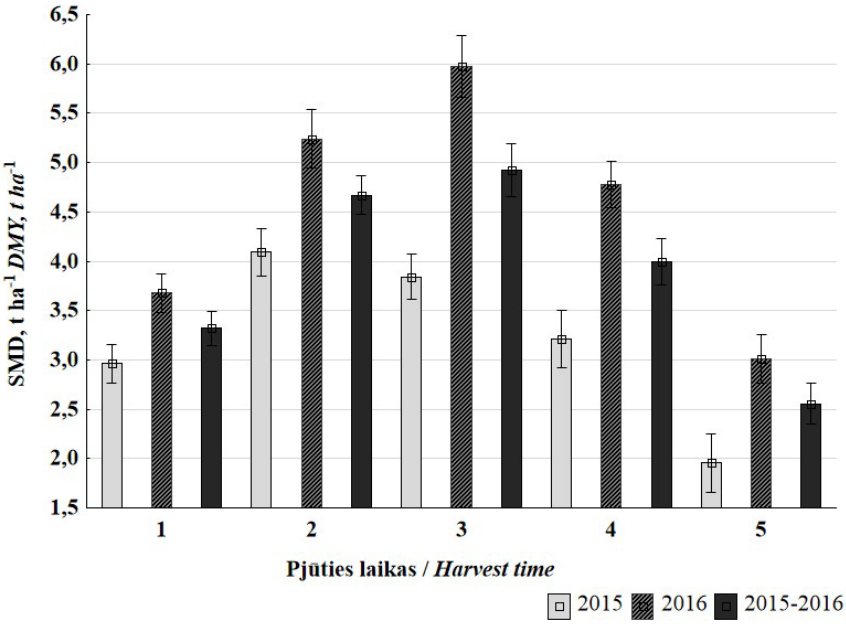
[1] trys veislės ir hibridinė populiacija / *three cultivars and one hybrid population*

Pagal dvejų tyrimo metų duomenis nustatyta, kad pasėliuose esminiai didžiausias biomasės SM derlius gautas augalus nupjovus 216 – 221 metų dienomis (toliau – m. d.) (4,64 t ha^{-1}) bei 279 – 277 m. d. (4,90 t ha^{-1}) (23 pav.). Pirmais metais SM derlius rugpjūtyje (216 – 221 m. d.) esminiai nesiskyrė nuo derliaus spalio mėnesį (279 – 277 m. d.), nors jis buvo 6,51 % didesnis. Tačiau antrais metais patikimai didesnis biomasės SM derlius nustatytas spalyje. (279 – 277 m. d.), kuris buvo 15,02 lyginant su rugpjūčio mėnesio derliumi.

Labai dideli biomasės SM derliaus skirtumai nustatyti palyginus atskirų metų duomenis. Antrais metais visose pjūtyse SM derlius buvo esmingai didesnis (23 pav.). Pavyzdžiui, antrų metų rugpjūtyje SM derlius buvo 26,89 % didesnis nei pirmais metais, o gruodžio pradžioje – net 60,43 % didesnis.

Vidutiniai dvejų metų duomenys parodė, kad pasėliuose rykštinės soros biomasės SM derlius žiemos pradžioje (337 – 333 m. d.) buvo 4,18 t ha^{-1}, t. y., 14,69 % mažesnis lyginant su spalio mėnesį gautu derliumi (23 pav.). Pirmais metais nuo spalio iki gruodžio nustatytas 16,40 % SM derliaus nuostolis, o antrais metais – 13,73 % nuostolis. Po žiemos ankstyvą pavasarį (90 – 91 m. d.) rykštinės soros SM derlius pasėliuose buvo mažiausias (2,37 t ha^{-1}) arba 51,63 % mažesnis nei spalyje. Pirmais metais nuo spalio iki kovo nustatytas 49,21 % SM derliaus nuostolis, o antrais metais – 53,26 % nuostolis.

D. M. Wilson et al. (2013) nustatė, kad pasėliuose rykštinės soros augalus pjaunant po šalnų buvo gautas 17 – 22 % mažesnis biomasės SM derlius nei rugpjūčio mėnesį, o pavasarį – SM derliaus nuostolis siekė 37 %. Nors Lietuvoje pavasarį nupjautų augalų biomasės SM derliaus nuostolis buvo daug didesnis, tačiau tyrimų rezultatai patvirtina minėtų autorių išvadas, kad optimaliausias rykštinės soros pjovimo laikas yra po šalnų, ar žiemos pradžioje.



23 paveikslas. Rykštinės soros augintos pasėlyje biomasės sausųjų medžiagų derlius (SMD), pjaunant augalus skirtingu laiku 2015 ir 2016 m. Pjūties laikas išreikštas metų diena nuo sausio 1 d.: 1 – 194; 2 – 216 ir 221; 3 – 279 ir 277; 4 – 337 ir 333; 5 – 90 ir 91. Grafike pažymėtos standartinės paklaidos

Figure 23. The average dry matter yield (DMY) of switchgrass crop at different harvest time in 2015 and 2016. Harvest time is expressed as day of year after 1 January: 1 – 194; 2 – 216 and 221; 3 – 279 and 277; 4 – 337 and 333; 5 – 90 and 91. Error bars indicate standard error of the mean

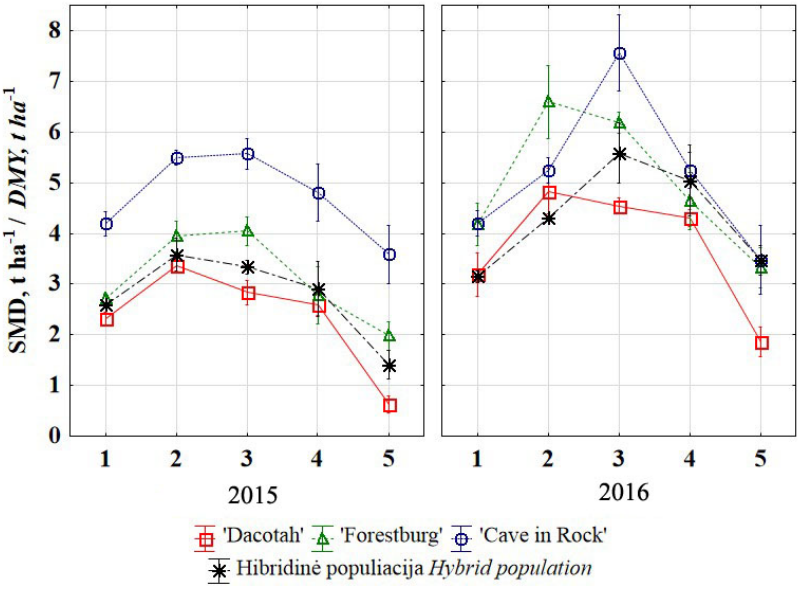
Tačiau kai kurie autoriai publikuoja kitokius rezultatus. J. M. Johnson ir G. L. Gresham (2014) ištyrę rykštinės soros biomasės derlių Minesotoje nustatė, kad pavasarį tikėtini tik iki 10 % SM derliaus nuostoliai lyginant su vėlyva rudenine pjūtimi. Panašius rezultatus publikavo ir D. Lee et al. (2009) konstatuodami, kad nėra didelių biomasės derliaus skirtumų augalus nupjovus rudenį ir jiems peržiemojus. Tačiau šie autoriai paaiškina, kad tokie rezultatai buvo gauti išanalizavus nedidelius biomasės ėminius. Daug didesni biomasės derliaus nuostoliai tikėtini pasėlius nupjovus mechanizuotai. Tai patvirtina mūsų tyrimo rezultatai.

Šiame tyrime meteorologinės sąlygos buvo pagrindinis veiksnys nulėmęs nemažus rykštinės soros biomasės SM derliaus nuostolius pavasarį. Viskonsine M. H. N. Tahir et al. (2011) parodė, kad žiemą bioenerginio augalo nendrinio dryžučio biomasės derlius būna esminiai mažesnis nei rudenį, o kai kuriais metais šio augalo biomasės derlius gali būti visiškai prarastas, sniego dangai išguldžius augalus. D. M. Wilson et al. (2013) taip pat teigia, kad vidutinio klimato šalyse žiemos laikotarpiu ir pavasarį dėl meteorologinių sąlygų, ypač snieguotumo, dideli rykštinės soros biomasės derliaus nuostoliai yra tikėtini. Mūsų tyrimo metais stora sniego danga žiemos laikotarpiu nebuvo charakteringa. Lietuvoje dienų su sniego danga skaičius skirtingais metais gali labai svyruoti, o didelė orų kaita žiemą lemia nepastovų sniego dangos storį, skirtingą akumuliacinio laikotarpio

trukmę, atodrėkių dažnumą (Gečaitė, Rimkus, 2010). Be snieguotumo svarbūs ir kiti meteorologiniai rodikliai pvz., kritulių kiekis, vėjo greitis, kurie tyrimo metais galėjo nulemti didelius rykštinė soros biomasės SM derliaus nuostolius augalus palikus žiemoti.

Pasėliuose palyginus trijų rykštinės soros veislių bei hibridinės populiacijos vidutinį dvejų metų biomasės SM derlių nustatyta, kad visose pjūtyse veislė 'Cave in Rock' buvo esminiai produktyviausia (24 pav.). Lyginant su 'Cave in Rock', veislės 'Forestburg' metinis (2015–2016 m.) SM derlius buvo 19,60 % mažesnis, 'Dacotah' – 39,60 % mažesnis, o hibridinės populiacijos – 31,28 % mažesnis. Panašus minėtų veislių biomasės produktyvumo įvertis nustatytas ir II genetinėje kolekcijoje (21 pav.), kur augalai augo mažame konkurenciniame fone.

Pirmais derliaus metais veislės 'Cave in Rock' didžiausias SM derlius (5,56 t ha^{-1}) nustatytas spalio pradžioje (279 m. d.), tačiau jis esminiai nesiskyrė nuo rugpjūčio mėn. (216 m. d.) derliaus (5,50 t ha^{-1}) (24 pav.). Antrais metais spalio mėnesį (277 m. d.) SM derlius buvo esminiai didžiausias lyginant su kitomis pjūtimis (7,55 t ha^{-1}). Dvejų metų duomenimis nustatyta, kad veislės 'Cave in Rock' SM derlius nuo spalio iki gruodžio mėnesio sumažėjo 11,87 %, o nuo spalio iki kovo – 50,52 %.



24 paveikslas. Rykštinės soros, augintos pasėliuose, trijų veislių ('Dacotah', 'Forestburg', 'Cave in Rock') bei hibridinės populiacijos biomasės sausųjų medžiagų derlius (SMD) pjaunant augalus skirtingu laiku, 2015 ir 2016 m. Pjūties laikas išreikštas metų diena nuo sausio 1 d.: 1 – 194; 2 – 216 ir 221; 3 – 279 ir 277; 4 – 337 ir 333; 5 – 90 ir 91. Grafike pažymėtos standartinės paklaidos

Figure 24. Dry matter yield (DMY) of three switchgrass cultivars ('Dacotah', 'Forestburg', 'Cave in Rock') and hybrid population at different harvest time in 2015 and 2016. Harvest time is expressed as day of year after 1 January: 1 – 194; 2 – 216 and 221; 3 – 279 and 277; 4 – 337 and 333; 5 – 90 and 91. Error bars indicate standard error of the mean

Panašus, tačiau šiek tiek didesnis šios veislės SM derlius gautas ir JAV. D. M. Wilson et al. (2013) nustatė, kad Ajovos valstijoje antrų metų pasėliuose veislės 'Cave in Rock' SM derlius buvo didžiausias rugpjūčio mėnesį (8,6 t ha^{-1}). Lapkričio mėnesį SM derlius sumažėjo iki 6,7 t ha^{-1}, o pasėlius palikus peržiemoti balandžio mėnesį SM derlius

buvo 4,2 t ha^{-1}. Piečiau esančiose Europos šalyse atlikti tyrimai parodė, kad pvz., Vokietijoje veislės 'Cave in Rock' biomasės SM derlius pirmųjų derliaus metų žiemos pradžioje kito nuo 3,0 t ha^{-1} iki 6,4 t ha^{-1}. Pavasarį po žiemos gautas SM derlius buvo gerokai mažesnis, t. y., 1,5 – 1,8 t ha^{-1}. Olandijoje ir Anglijoje šios veislės SM derlius sausio – vasario mėnesiais atskirais metais svyravo nuo 0,6 t ha^{-1} iki 14,6 t ha^{-1} (Elbersen et al., 2001).

Šiame tyrime veislės 'Forestburg' didžiausias biomasės SM derlius nustatytas spalio (277 m. d.) (2015 m. – 4,04 t ha^{-1}) ir rugpjūčio (221 m. d.) mėnesiais (2016 m.– 6,38 t ha^{-1}) (24 pav.). Tarpusavyje šių pjūčių SM derlius tiek 2015 m., tiek ir 2016 m. esminiai nesiskyrė. Palyginus atskirų metų duomenis nustatyta, kad antrais metais rugpjūčio ir spalio mėnesiais gautas derlius buvo 61,92 % ir 52,97 % didesnis nei pirmais metais. Remiantis vidutiniais dvejų metų duomenimis nustatyta, kad veislės 'Forestburg' SM derlius nuo spalio iki gruodžio sumažėjo 27,59 %, o nuo spalio iki kovo – 48,14 %.

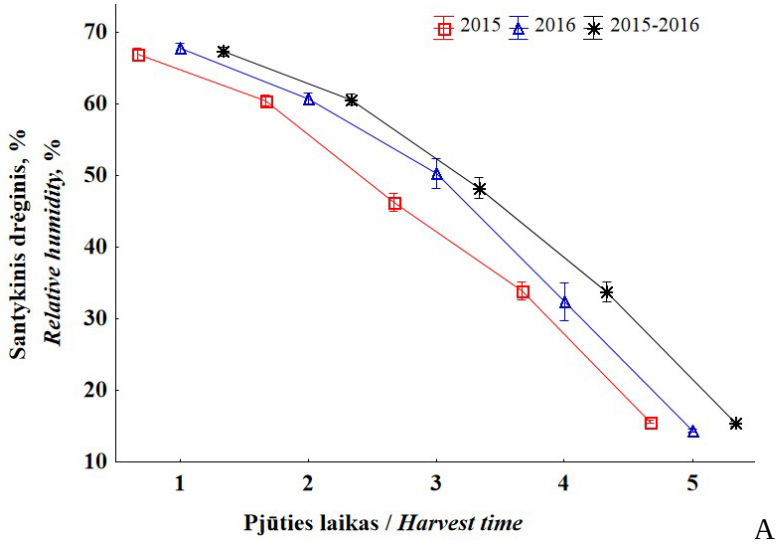
Pasėlyje veislės 'Dacotah' esminiai didžiausias biomasės SM derlius gautas rugpjūčio mėnesį (216 ir 221 m. d.), kuris atskirais metais kito nuo 3,35 t ha^{-1} iki 4,83 t ha^{-1} (24 pav.). Vidutiniai dvejų metų duomenys parodė, kad 'Dacotah' biomasės SM derlius nuo spalio iki gruodžio mėnesio sumažėjo 4,97 %, o nuo spalio iki kovo – 65,74 %.

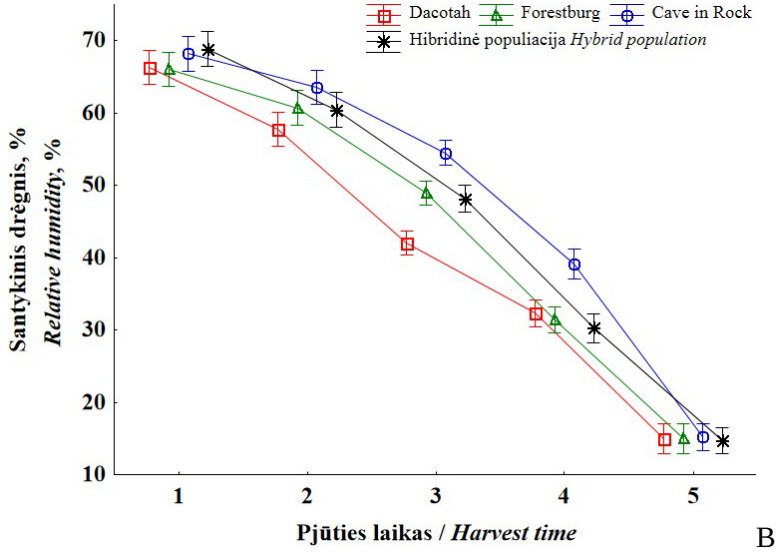
Pirmais derliaus metais hibridinės populiacijos didžiausias SM derlius (3,58 t ha^{-1}) nustatytas rugpjūtyje (216 m. d.), tačiau jis esminiai nesiskyrė nuo spalio (279 m. d.) derliaus (3,33 t ha^{-1}) (24 pav.). Antrais metais spalyje (277 m. d.) SM derlius buvo didžiausias (5,58 t ha^{-1}), tačiau ji esminiai nesiskyrė nuo guodžio mėnesio derliaus. Vidutiniais dvejų metų duomenimis nustatyta, kad hibridinės populiacijos SM derlius nuo spalio iki gruodžio mėnesio sumažėjo 10,98 %, o nuo spalio iki kovo – 51,56 %.

Nors pasėlius pjaunant žiemą ar pavasarį biomasės SM derlius gaunamas esmingai mažesnis, tačiau šios pjūtys turi ir reikšmingos ūkinės naudos, nes augalų biomasės drėgnis taip pat sumažėja. Biomasės, kaip žaliavos kietajam kurui, drėgnis yra labai svarbus jos kokybės rodiklis. Deginant drėgną kurą, krenta kūryklos temperatūra, blogėja šilumos mainai (Miškinis ir kt., 2011). Be to, sandėliuojant drėgną augalų biomasę joje atsiranda pelėsių ir grybelių, kurie sukelia biomasės saugojimo problemas.

Remiantis dvejų tyrimo metų duomenimis nustatyta, kad didžiausias santykinis rykštinės soros biomasės drėgnis (67,35 %) buvo liepos mėnesį (194 m. d.) (25 pav. A).

Tiriamos populiacijos pagal šį rodiklį skyrėsi nežymiai (25 pav. B). Pasėlius nupjovus spalyje (337 – 333 m. d.), biomasės santykinio drėgnio vertė buvo esminiai mažesnė, t. y., 48,28 %. Šioje pjūtyje palyginus tiriamas veisles nustatyta, kad 'Dacotah' biomasės drėgnis buvo esminiai mažiausias (42,05 %), o 'Cave in Rock' – esminiai didžiausias (54,54 %). Biomasės drėgnio skirtumus tarp veislių galima paaiškinti ne vienoda jų branda: 'Dacotah' buvo ankstyviausia veislė, o 'Cave in Rock' – vėlyviausia. Rudenį biomasės drėgnis priklausė ir nuo aplinkos meteorologinių sąlygos. Palyginus atskirų metų spalio mėnesio biomasės drėgnį matyti, kad sausesniais metais (2015 m.) jis buvo 8,13 % mažesnis nei drėgnesniais (2016 m.). Kitose pjūtyse biomasės drėgnio skirtumai tarp metų buvo statistiškai nepatikimi.





25 paveikslas. A – rykštinės soros biomasės santykinis drėgnis pjaunant augalus skirtingu laiku, 2015 ir 2016 m. B – trijų veislių ('Dacotah', 'Forestburg', 'Cave in Rock') bei hibridinės populiacijos vidutinis dvejų metų biomasės santykinis drėgnis pjaunant augalus skirtingu laiku. Pjūties laikas išreikštas metų diena nuo sausio 1 d.: 1 – 194; 2 – 216 ir 221; 3 – 279 ir 277; 4 – 337 ir 333; 5 – 90 ir 91. Grafike pažymėtos standartinės paklaidos

Figure 25. A – relative humidity switchgrass aboverground biomass at different harvest time in 2015 and 2016 years. B – the average (two years) biomass relative humidity of three switchgrass cultivars ('Dacotah', 'Forestburg', 'Cave in Rock') and hybrid population at different harvest time. Harvest time is expressed as day of year after 1 January: 1 – 194; 2 – 216 and 221; 3 – 279 and 277; 4 – 337 and 333; 5 – 90 and 91. Error bars indicate standard error of the mean

Vidutiniais dvejų metų duomenimis nustatyta, kad pasėliuose augalų biomasės SM drėgnis žiemos pradžioje (337 – 333 m. d.) sumažėjo iki 33,12 %, o po žiemos, ankstyvą pavasarį (90 – 91 m. d.) – jis tesiekė 14,97 % (25 pav. A). Pavasarį visų tirtų veislių ir

hibridinės populiacijos biomasės drėgnis skyrėsi tik nežymiai: 'Dacotah' – 15,02 %, 'Forestburg' – 15,01 %, 'Cave in Rock' – 15,21 %, hibridinės populiacijos – 14,68 %. Tokio drėgnio biomasės nereikia papildomai džiovinti, taip sutaupomi biokuro gamybos kaštai. Tačiau augalus ilgai laikant nenupjautus lauke labai padidėja derliaus nuostoliai – pavasarį pasėliuose netenkama vidutiniškai 51,23 % sausųjų medžiagų derliaus (23 pav.). Literatūroje nurodoma, kad naudojant tiesioginę netradicinių žolinių augalų nuėmimo technologiją augalus galima pjauti ir smulkinti vėlai rudenį arba žiemą, kai jų biomasės drėgnis sumažėja iki 50 % ir mažiau (Sakalauskas, 2014). Mūsų atlikti tyrimai parodė, kad kietojo biokuro gamybai pasėliuose rykštinės soros augalus optimaliausia pjauti spalio mėnesį arba pašalus, žiemos pradžioje.

Apibendrinimas. *Pasėliuose rykštinės soros biomasės SM derlius esmingai priklauso nuo metų meteorologinių sąlygų, pjūties laiko ir genotipo. Remiantis vidutiniais dvejų metų duomenimis nustatyta, kad pasėliuose esminiai didžiausias biomasės SM derlius gautas augalus nupjovus 216 – 221 metų dienomis (4,64 t ha^{-1}) bei 279 – 277 m. d. (4,90 t ha^{-1}). Pasėliuose augalų biomasės SM derlius žiemos pradžioje (337 – 333 m. d.) buvo vidutiniškai 14,69 % mažesnis lyginant su spalyje gautu derliumi. Pasėliuose palikus augalus žiemoti, ankstyvą pavasarį (90 – 91 m. d.) rykštinės soros SM derlius buvo mažiausias (vidutiniškai 2,37 t ha^{-1}) arba 51,63 % mažesnis nei spalyje. Antrais metais visose pjūtyse SM derlius buvo esmingai didesnis nei pirmais metais: rugpjūtyje – 26,89 %, o gruodžio pradžioje – net 60,43 % didesnis.*

Palyginus trijų rykštinės soros veislių bei hibridinės populiacijos vidutinius dvejų metų biomasės SM derlius nustatyta, kad visose pjūtyse veislė 'Cave in Rock' buvo esminiai produktyviausia. Veislės 'Cave in Rock' esminiai didžiausias SM derlius nustatytas spalio mėnesį (279 m. d.) (vidutiniškai 6,65 t ha^{-1}). Nuo spalio iki gruodžio jos SM derlius sumažėjo 11,87 %, o nuo spalio iki kovo – 50,52 %. Analogiškos kitimo tendencijos nustatytos kitose tirtose veislėse bei hibridinėje populiacijoje.

Remiantis dvejų tyrimo metų duomenimis nustatyta, kad rykštinės soros, augintos pasėliuose, mažiausias santykinis biomasės drėgnis buvo augalus palikus žiemoti lauke ir pjaunant ankstyvą pavasarį (14,97 %). Žiemos pradžioje nupjautų augalų biomasė taip pat buvo optimalaus drėgnio (33,12 %). Tiriamos veislės ir hibridinė populiacija pagal biomasės drėgnį šiose pjūtyse skyrėsi nedaug. Tačiau spalyje veislės 'Dacotah' biomasės drėgnis buvo esminiai mažiausias (42,05 %), o 'Cave in Rock' – esminiai didžiausias (54,54 %). Atliktų tyrimų rezultatai patvirtina, kad Lietuvoje optimaliausias rykštinės soros pjovimo laikas yra po šalnų, ar žiemos pradžioje.

3.3. Rykštinės soros biomasės cheminės sudėties kaitos ypatumai

3.3.1. Anglies ir azoto koncentracijos rykštinės soros biomasėje

Vertinant rykštinę sorą kaip daugiafunkcinį energinį augalą, vienas iš svarbiausių uždavinių yra ištirti organinių medžiagų sudėtį ir jos komponentų pasiskirstymą biomasėje. Siekiant išsiaiškinti anglies (C) ir azoto (N) kaitos pobūdį rykštinės soros biomasėje, augalai buvo pjaunami skirtingu metų laiku. Taip pat buvo įvertintas šių kokybės komponentų pasiskirstymas augalų antžeminių morfologinių dalių biomasėje, t. y. stiebuose, lapuose ir žiedynuose.

Anglis, sukaupta biomasėje įvairių organinių junginių pavidalu, gali būti konvertuojama į tinkamas naudojimui energijos formas, pvz., metaną, bioetanolį arba kietąjį kurą.

Supratimas apie anglies sankaupas ir pasiskirstymą antžeminėje biomasėje vaidina svarbų vaidmenį optimizuojant energinės žaliavos apdorojimo technologijas.

Šiame tyrime dispersinė analizė parodė, kad C koncentracija rykštinės soros biomasėje esmingai priklauso nuo metų (2 priedas). Pirmais derliaus metais neatsižvelgiant į pjūties laiką, vidutinė C koncentracija biomasėje buvo didžiausia ir siekė 486,81 g kg^{-1} SM, o antrais derliaus metais – 0,55 % sumažėjo (10 lentelė).

10 lentelė. C, N koncentracijos bei C:N santykio kaitos dėsningumai rykštinės soros biomasėje priklausomai nuo metų ir pjūties laiko, 2015–2016 m.

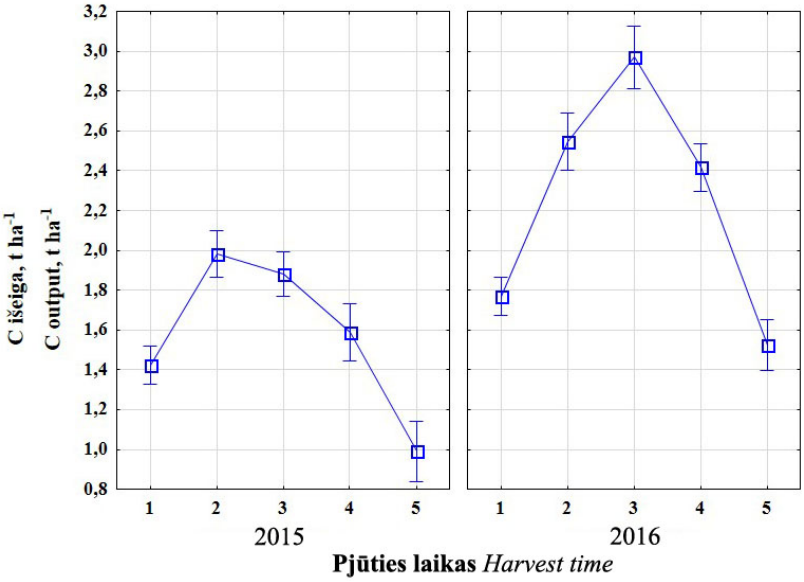
Table 10. The concentration of C, N and C:N ratio of switchgrass biomass depending on harvest year and harvest time in 2015–2016 m.

Metų diena[1] ***Day of Year[1]***	**Metai** ***Year***	**C**	**N**	**C:N**
		g kg^{-1} SM / g kg^{-1} DM		
		Vid.±SE ***Mean±SE***	**Vid.±SE** ***Mean±SE***	**Vid.±SE** ***Mean±SE***
194	2015	480,60±0,09	9,97±0,21	38,06±1,28
	2016	481,32±0,06	10,12±0,10	47,56±0,49
216 – 221	2015	484,17±0,09	9,97±0,10	48,60±1,04
	2016	485,17±0,09	8,35±0,32	58,33±2,13
279 – 277	2015	496,72±0,07	6,47±0,35	77,46±4,18
	2016	489,67±0,08	6,60±0,76	76,92±7,94
279 – 277[2]	2015	485,75±0,09	12,13±0,32	40,09±0,97
	2016	480,33±0,10	10,34±0,53	46,83±2,46
Eksperimento vid. *Average of trial*		485,47	9,25	54,23
Veiksnys: Metai / *Factor: Year*				
LSD_{05} / LSD_{01}		0,69 / 0,93	0,28 / 0,38	2,43 / 3,31
Veiksnys: Pjūtis / *Factor: Cut*				
LSD_{05} / LSD_{01}		1,19 / 1,62	0,48 / 0,66	4,21 / 5,73
Sąveika: Metai x Pjūtis / *Interaction: Year x Cut*				
LSD_{05} / LSD_{01}		1,82 / 2,48	0,74 / 1,01	6,43 / 8,75

[1] 2015 ir 2016 metų diena / [1] *day of year in 2015 and 2016*

[2] atolas po pirmosios pjūties 194 metų dieną / [2] *aftermath from first cut at day 194*

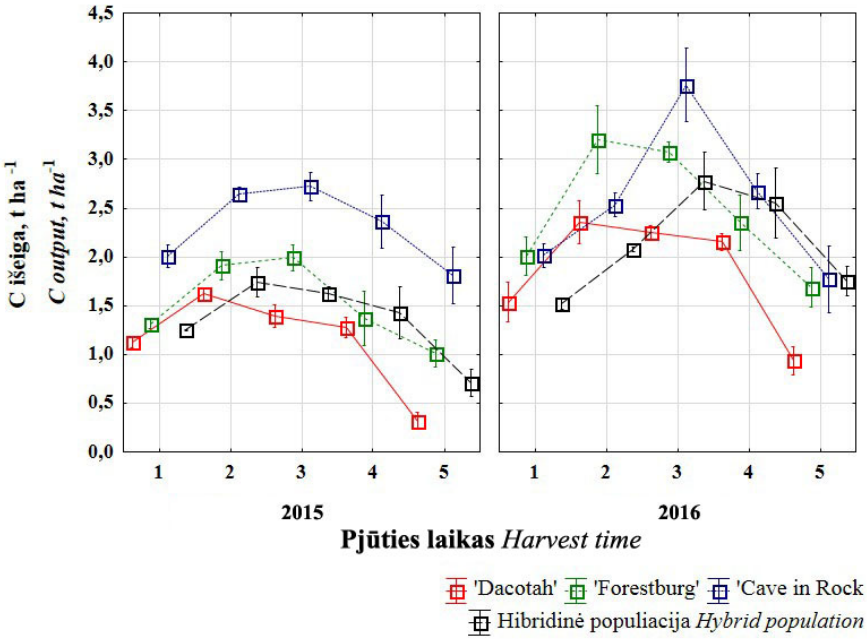
Vertinant biomasės C išeigą ploto vienete (t ha^{-1}) nustatyta, kad antrais derliaus metais (nepriklausomai nuo pjūties laiko) ji siekė 2,29 t ha^{-1} ir buvo 42,67 % didesnė nei pirmais metais (26 pav.).



26 paveikslas. Rykštinės soros antžeminės biomasės angies išeiga (t ha^{-1}) skirtingose pjūtyse, 2015 ir 2016 m. Pjūties laikas išreikštas metų diena nuo sausio 1 d.: 1 – 194; 2 – 216 ir 221; 3 – 279 ir 277; 4 – 337 ir 333; 5 – 90 ir 91. Grafike pažymėtos standartinės paklaidos

Figure 26. The carbon gain (t ha^{-1}) of switchgrass aboveground biomass under different harvest time in 2015 and 2016. Harvest time is expressed as day of year after 1 January: 1 – 194; 2 – 216 and 221; 3 – 279 and 277; 4 – 337 and 333; 5 – 90 and 91. Error bars indicate standard error of the mean

Pirmais derliaus metais augalų biomasę nupjovus 216 m. d. nustatyta didžiausia C išeiga (vidutiniškai 1,98 t ha^{-1}). Šis laikotarpis daugumos tirtų populiacijų sutapo su jų žydėjimo tarpsniu. Šiek tiek mažesnė C išeiga (vidutiniškai 1,88 t ha^{-1}) gauta biomasę nupjovus augalų sėklų brandos ar senėjimo tarpsniuose (279 m. d.). Skirtumas tarp minėtų pjūčių buvo neesminis. Antrais derliaus metais didžiausia C išeiga gauta biomasę nupjovus 277 m. d. (vidutiniškai 2,96 t ha^{-1}). Vėlesnėse pjūtyse, t. y. vegetacijai pasibaigus (337 ir 333 m. d.) bei po žiemos (90 ir 91 m. d.) C išeiga esmingai mažėjo. Rykštinės soros antžeminę biomasę nupjovus po žiemos kitų metų pavasarį, C išeiga buvo vidutiniškai 0,98 t ha^{-1} (2015 m.) ir 1,52 t ha^{-1} (2016 m.). Būtina atsižvelgti į tai, kad žiemą dalis augalų morfologinių struktūrų (lapų, žiedynų) nukrito ir suiro, taip papildydami C sankaupas dirvožemyje. Palyginus rykštinės soros lauko eksperimento bei kolekcijų dirvožemio agrocheminių rodiklių vertes, prieš pasodinant augalus bei tyrimams pasibaigus, nustatytas nuo 8,45 % (po 2 metų) iki 45,52 % (po 4 metų) dirvožemio organinės anglies kiekio padidėjimas (1 lentelė). A. B. Frank et al. (2004) nustatė, kad rykštinė sora gali užauginti itin didelę požeminių organų biomasę (7670 kg ha^{-1}), kurioje sukaupia net 82 % visų augalo anglies rezervų. Rykštinės soros potencialas sukaupti didelius anglies kiekius yra svarbus ekologiniu požiūriu, nes tai gali padėti užtikrinti stabilų organinių medžiagų balansą bei ilgalaikį dirvožemio produktyvumą.



27 paveikslas. Rykštinės soros veislių 'Dacotah', 'Forestburg', 'Cave in Rock' bei hibridinės populiacijos antžeminės biomasės anglies išeiga (t ha^{-1}) skirtingose pjūtyse, 2015 ir 2016 m. Pjūties laikas išreikštas metų diena nuo sausio 1 d.: 1 – 194; 2 – 216 ir 221; 3 – 279 ir 277; 4 – 337 ir 333; 5 – 90 ir 91. Grafike pažymėtos standartinės paklaidos

***Figure* 27.** The carbon gain (t ha^{-1}) of aboverground biomass for switchgrass cultivars 'Dacotah', 'Forestburg', 'Cave in Rock' and hybrid population under different harvest time in 2015 and 2016. Harvest time is expressed as day of year after 1 January: 1 – 194; 2 – 216 and 221; 3 – 279 and 277; 4 – 337 and 333; 5 – 90 and 91. Error bars indicate standard error of the mean

Tyrimų metais didžiausią C išeigą turėjo vėlyviausia veislė 'Cave in Rock': spalyje (279 ir 277 m. d.) jos biomasės C išeiga siekė vidutiniškai 2,72 ir 3,76 t ha^{-1} (27 pav.). Šioje pjūtyje ankstyviausios veislės 'Dacotah' biomasės C išeiga buvo mažesnė 48,89 % ir 40,42 %; veislės 'Forestburg' – mažesnė 26,83 % ir 18,35 %, o hibridinės populiacijos – mažesnė 40,44 % ir 26,32 %.

Biomasėje, skirtoje deginimui, nedideli azoto (N) kiekiai yra neišvengiami ir problemos nesudaro, tačiau didesni – NO_x pavidalu gali teršti aplinką, sukelti rūgštaus lietaus susidarymą, paskatinti gamtinių sistemų eutrofikaciją. Biodujų gamybos procesuose, priešingai – azotas ir azotinės medžiagos yra pageidaujamos. Azoto koncentracija medienos biomasėje sudaro apie 0,26 %, tačiau įvairioje agromasėje (javų šiaudai, daugiametės žolės) azoto kiekiai siekia 1 % (Pedišius ir kt., 2016).

Atliktų tyrimų duomenimis nustatyta, kad N koncentracija rykštinės soros biomasėje statistiškai patikimai priklauso nuo metų, pjūties laiko ir šių veiksnių sąveikos įtakos (2 priedas). Pirmaisiais derliaus metais nepriklausomai nuo pjūties laiko vidutinė N koncentracija biomasėje siekė 9,64 g kg^{-1} SM, o antraisiais – sumažėjo 8,19 %. Lyginant skirtingų pjūčių vidutinius dvejų metų duomenis nustatyta, kad turtingiausia azotu buvo ankstyviausios pjūties (194 m. d.) bei po šios pjūties atžėlusio atolo biomasė (10 lentelė). Azotas įeina į baltymų ir nukleorūgščių sudėtį. Taip pat jis yra chlorofilo, ATP, kofermentų, vitaminų, augimo reguliatorių ir kitų junginių sudėtinė dalis. Po žiemos prasidėjus vegetaci-

jos sezonui ar po pjūčių, atliktų augalams nespėjus pasiekti generatyvinės brandos, augalai yra orientuoti į biomasės auginimą. Rykštinės soros augalus nupjovus vegetacijos sezono pabaigoje (279 – 277 m. d.) N koncentracija biomasėje buvo mažesnė 34,78 – 35,10 % nei liepos mėnesį (194 m. d.). Reikšmingas N koncentracijos sumažėjimas biomasėje gali būti susiję su augalo reakcija į nepalankias aplinkos sąlygas prieš žiemą. Tuo metu augaluose silpnėja aminorūgščių sintezė, spartėja baltymų skilimas ir skilimo produktų pernaša bei sandėliavimas požeminiuose organuose. Taip pat antžeminėje biomasėje keičiasi augalų morfologinių frakcijų (lapų ir stiebų) santykis, daugėja struktūrinių elementų ir audinių, kurių sudėtyje yra nedaug N. Kadangi N koncentracija biomasėje nuo birželio iki spalio (BBCH 5 ir BBCH 8 – 9 atitinkamai) sumažėjo vidutiniškai apie 1,5 karto, o C koncentracija – padidėjo, tai patvirtina rykštinės soros biomasės, kaip kietojo kuro, kokybės pagerėjimą.

Literatūros duomenimis biodujų gamybos procesui optimalus C ir N santykis yra nuo 20:1 iki 30:1 (Klimiuk et al., 2010). C:N santykio vertės rykštinės soros biomasėje esminiai skyrėsi priklausomai nuo derliaus metų bei pjūties laiko (2 priedas). Vidutinė C:N santykio vertė pirmais derliaus metais nepriklausomai nuo pjūties buvo vidutiniškai 51,05 arba 11,07 % mažesnė negu antrais metais. Tik pirmais derliaus metais liepos mėnesį (194 m. d.) nupjauta biomasė turėjo optimaliausią perdirbimui į biodujas C:N santykio vertę, tačiau kiek didesnę nei rekomenduojama (vidutiniškai 38,06) (10 lentelė). Vėlesnėse pjūtyse (216 – 221 bei 279 – 277 m. d.) C:N santykio vertės, dėl mažo azoto kiekio biomasėje, dar labiau padidėjo ir siekė vidutiniškai 53,47 ir 77,19. Abiem tyrimų metais rykštinės soros atolo biomasė, vertinant ją kaip žaliavą biodujoms, pagal cheminę sudėtį buvo prastesnės kokybės negu pirmos pjūties biomasė. Rykštinės soros biomasės kokybę iki optimalios biodujų gamybai būtų galima koreguoti pridėjus baltymingų atliekų ar kitų N turtingų priedų.

Apibendrinimas. *Vertinant rykštinės soros antžeminės biomasės organinius junginius, susijusius su panaudojimo įvairioms biokuro rūšims perspektyvumu ir su poveikiu aplinkai bei gamybos procesui nustatyta, kad biomasės pjūties laikas ir metai yra svarbūs veiksniai nuo kurių priklausė šių junginių koncentracijų kitimo dinamika biomasėje.*

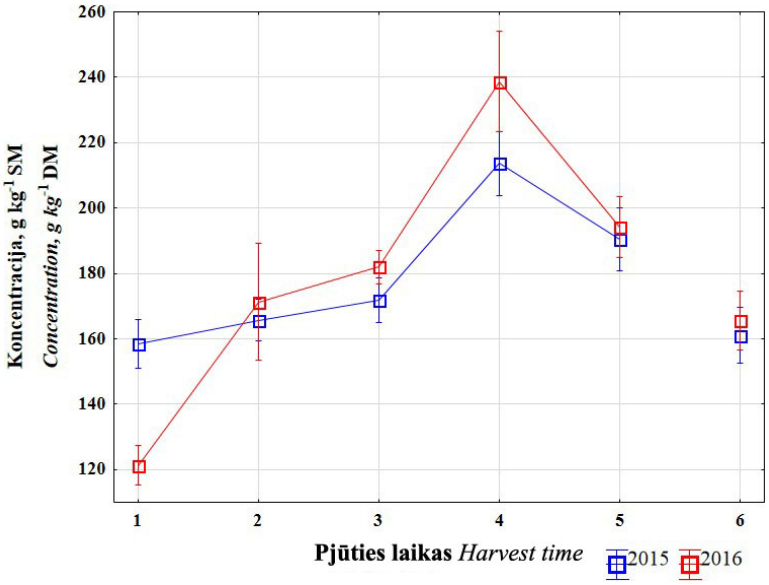
Pirmais derliaus metais C koncentracija biomasėje buvo esmingai didesnė negu antrais. Abiem tyrimų metais rykštinės soros augalai daugiausiai anglies sukaupė biomasėje nupjautoje 277 – 279 metų dienomis (vidutiniškai 493,2 g kg^{-1} SM). Vidutiniais dvejų metų duomenimis nustatyta, kad didžiausia biomasės C išeiga gauta 216 – 221 bei 279 – 277 metų dienomis (vidutiniškai 2,26 t ha^{-1}ir 2,42 t ha^{-1} atitinkamai). Biomasės C išeiga esmingai priklausė ne tik nuo metų, pjūties laiko, bet ir nuo veislės. Abiem tyrimų metais augalus pjaunant spalio mėnesį didžiausią biomasės C išeigą turėjo vėlyva veislė 'Cave in Rock' (vidutiniškai 3,24 t ha^{-1}).

Azoto koncentracija rykštinės soros biomasėje esmingai priklausė nuo metų, pjūties laiko bei šių veiksnių sąveikos įtakos. Pirmais derliaus metais N koncentracija biomasėje buvo didesnė negu antrais (vidutiniškai 9,64 g kg^{-1} SM). Gausiausia azotu buvo pirmos pjūties (194 m. d.) bei atolo biomasė (vidutiniškai 10,04 g kg^{-1} SM ir 11,23 g kg^{-1} SM atitinkamai). Vidutinė C:N santykio vertė pirmais derliaus metais buvo 11,07 % mažesnė negu antrais metais. Pirmais derliaus metais liepos mėnesį nupjauta biomasė turėjo mažiausią C:N santykio vertę (vidutiniškai 38,06).

3.3.2. Lignino bei struktūrinių ir nestruktūrinių angliavandenių kaita rykštinės soros biomasėje

Ligninas yra ypač vertingas komponentas tiesioginiam deginimui skirtoje žaliavoje. Dėl mažesnio oksidacijos laipsnio, lyginant su kitais struktūriniais lignoceliuliozės komponentais (celiulioze ir hemiceliulioze), ligninas pasižymi didesne degimo energija (Demirbas, 2003). Rūgštaus detergento tirpale netirpus ligninas (ADL) yra visuotinai naudojamas pašarų ir anaerobiškai perdirbti skirtos biomasės vertinimo rodiklis. Klasono ligninas, apibūdinamas kaip 72 % sieros rūgštyje netirpus ligninas ir yra daugiau naudojamas biokuro kokybės vertinime (Sluiter et al., 2010). Paprastai, 72 % sieros rūgštyje netirpi lignino forma yra 30 % didesnė nei ADL pupinių augalų biomasėje ir nuo 2 iki 4 kartų didesnė už ADL miglinių žolių biomasėje (Hatfield et al., 1994; Adler et al., 2006).

Tyrimų rezultatai parodė, kad Klasono lignino koncentracija rykštinės soros biomasėje statistiškai patikimai priklausė nuo pjūties laiko (2 priedas). Vėlinant pjūties laiką Klasono lignino koncentracija biomasėje didėjo (28 pav.).



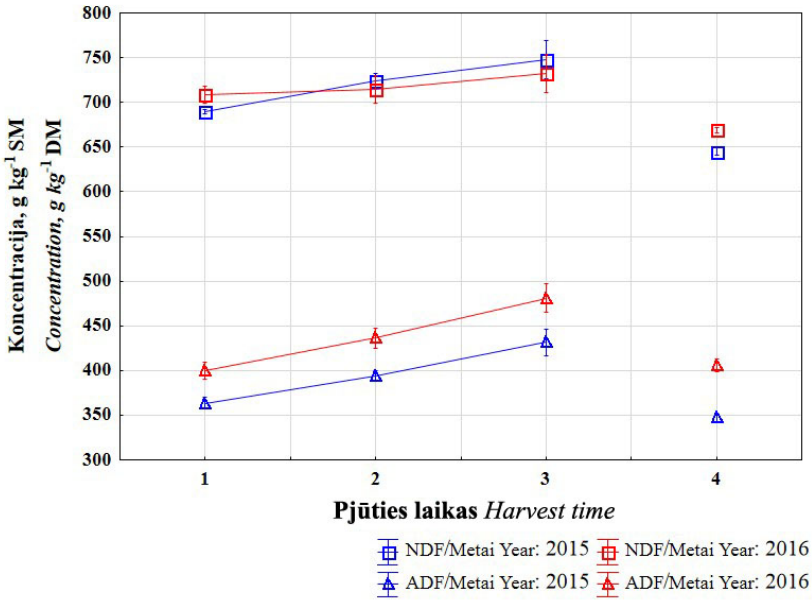
28 paveikslas. Klasono lignino koncentracija skirtingų pjūčių rykštinės soros antžeminėje biomasėje, 2015 ir 2016 m. Pjūties laikas išreikštas metų diena nuo sausio 1 d.: 1 – 194; 2 – 216 ir 221; 3 – 279 ir 277; 4 – 337 ir 333; 5 – 90 ir 91; 6 – atolas po pirmos pjūties. Grafike pažymėtos standartinės paklaidos

Figure 28. The concentration of Klason lignin in switchgrass aboveground biomass at different harvest time in 2015 and 2016. Harvest time is expressed as day of year after 1 January: 1 – 194; 2 – 216 and 221; 3 – 279 and 277; 4 – 337 and 333; 5 – 90 and 91; 6 –aftermath from first cut. Error bars indicate standard error of the mean

Remiantis vidutiniai dvejų metų duomenimis nustatyta, kad pirmoje pjūtyje (194 m. d.) Klasono lignino koncentracija buvo mažiausia ir tesiekė vidutiniškai 139,9 g kg^{-1} SM, o atžėlus atolui – vidutiniškai 163,32 g kg^{-1} SM. Vegetacijos sezono pabaigoje (279 ir

277 m. d.), daugumai augalų pasiekus sėklų brandos bei senėjimo tarpsnius, Klasono lignino koncentracija biomasėje išaugo 26,41 % lyginant su pirma pjūtimi. Vėlesnėse pjūtyse, t. y. žiemos pradžioje (337 ir 333 m. d.) bei po žiemos (90 ir 91 m. d.), augalai pagal šį rodiklį buvo 61,66 % ir 37,42 % labiau lignifikuoti nei 194 m. d. pjūtyje. Vidutiniai dvejų tyrimo metų duomenys parodė, kad rykštinės soros augalus nupjovus žiemos pradžioje (337 ir 333 m. d.) Klasono lignino koncentracija jų biomasėje buvo esminiai didžiausia ir vidutiniškai siekė 226,175 g kg^{-1} SM. Tai rodo šios pjūties biomasės tinkamumą kietojo kuro gamybai.

Vėlyvų pjūčių biomasė turėjo ne tik didesnę lignino koncentraciją, bet ir buvo turtingesnė ląsteliena (NDF, ADF) (29 pav.).



29 paveikslas. NDF ir ADF koncentracijos skirtingų pjūčių rykštinės soros antžeminėje biomasėje, 2015 ir 2016 m. Pjūties laikas išreikštas metų diena nuo sausio 1 d.: 1 – 194; 2 – 216 ir 221; 3 – 279 ir 277; 4 – atolas po pirmos pjūties. Grafike pažymėtos standartinės paklaidos

Figure 29. The concentration of NDF and ADF in switchgrass aboveground biomass at different harvest time in 2015 and 2016. Harvest time is expressed as day of year after 1 January: 1 – 194; 2 – 216 and 221; 3 – 279 and 277; 4 –aftermath from first cut. Error bars indicate standard error of the mean

Nemaistinės paskirties lignoceliuliozinių žaliavų energinis perspektyvumas yra siejamas su antrosios kartos biodegalų gamyba (Keshwani, Cheng, 2009). Tad, angliavandenių (struktūrinių ir nestruktūrinių) kiekio ištyrimas tam skirtoje biomasėje yra labai svarbus, nes jis yra tiesiogiai proporcingas išgaunamo etanolio kiekiui (Sluiter et al., 2010). Šiame tyrime dispersinė analizė parodė, kad ADF koncentracija rykštinės soros biomasėje esminiai priklausė nuo metų bei pjūties laiko, o NDF koncentracijai – metų įtaka buvo neesminė (2 priedas). Vėlinant pjūtis ADF ir NDF koncentracijos biomasėje palaipsniui didėjo (29 pav.). Remiantis vidutiniais dvejų metų duomenimis nustatyta, kad rykštinės soros biomasėje vegetacijos sezono pabaigoje (279 – 277 m. d.) ADF ir NDF koncentra-

cijos buvo didžiausios: 456,33 g kg^{-1} SM ir 740,16 g kg^{-1} SM atitinkamai. Mažiausiai ląstelienos per dvejus tyrimo metus buvo atolo biomasėje: vidutiniškai ADF – 376,63 g kg^{-1} SM, NDF – 657,21 g kg^{-1} SM (29 pav.).

Lignoceliuliozės bei jos pagrindinių komponentų (celiuliozės ir hemiceliuliozės) koncentracijų kitimas priklausė nuo pjūties laiko ir buvo susijęs su augalų branda. Remiantis vidutiniais dvejų metų duomenimis nustatyta, kad jauniausių pagal brandą augalų (194 m. d. arba BBCH 5 ir atolo arba BBCH 4) biomasėje celiuliozės koncentracija buvo mažiausia (vidutiniškai 340,55 g kg^{-1} SM ir 326,32 g kg^{-1} SM atitinkamai) (11 lentelė).

11 lentelė. Lignoceliuliozės frakcinės sudėties koncentracijų kaitos dėsningumai rykštinės soros biomasėje priklausomai nuo metų ir pjūties laiko, 2015–2016 m.

Table 11. The concentrations of fractional composition of lignocellulose of switchgrass biomass depending on harvest year and harvest time in 2015–2016 year

Metų diena[1] ***Day of Year[1]***	**Metai** ***Year***	**ADL**	**Hemiceliuliozė** ***Hemicellulose***	**Celiuliozė** ***Cellulose***
		g kg^{-1} SM / g kg^{-1} DM		
		Vid.±SE ***Mean±SE***	**Vid.±SE** ***Mean±SE***	**Vid.±SE** ***Mean±SE***
194	2015	49,00±1,98	326,50±5,20	314,50±5,02
	2016	51,12±1,86	300,50±9,08	366,60±2,29
216 – 221	2015	61,55±2,17	330,00±4,37	332,20±6,27
	2016	69,75±3,83	264,47±13,51	373,92±9,22
279 – 277	2015	75,12±3,44	316,50±12,82	356,37±12,12
	2016	74,75±6,44	251,15±5,61	406,42±10,49
279 – 277[2]	2015	45,50±2,53	297,75±4,53	301,75±2,78
	2016	55,12±3,01	263,40±5,13	350,90±4,49
Eksperimento vid. *Average of trial*		60,24	293,78	350,33
Veiksnys: Metai / *Factor:Year*				
LSD_{05} / LSD_{01}		2,63 / 3,59	6,28 / 8,55	5,44 / 7,41
Veiksnys: Pjūtis / *Factor:Cut*				
LSD_{05} / LSD_{01}		4,56 / 6,21	10,87 / 14,81	9,43 / 12,84
Sąveika: Metai x Pjūtis / *Interaction: Year x Cut*				
LSD_{05} / LSD_{01}		6,97 / 9,49	16,61 / 22,62	14,41 / 19,62

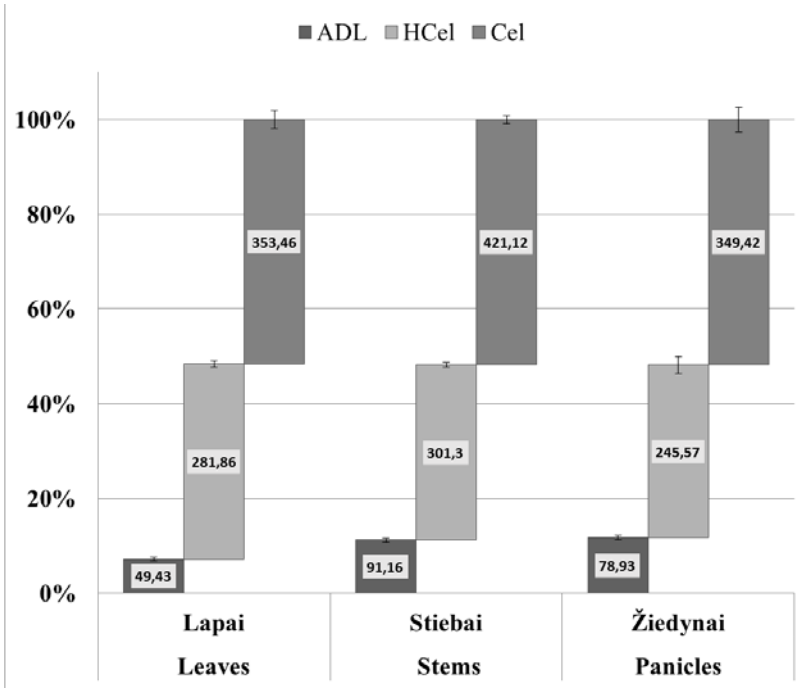
[1] 2015 ir 2016 metų diena / [1] *day of year in 2015 and 2016*

[2] atolas po pirmosios pjūties 194 metų dieną / [2] *aftermath from first cut at day 194*

Vėlinant pjūtis celiuliozės koncentracija didėjo. Vegetacijos sezono pabaigoje (279 ir 277 m. d.) celiuliozės koncentracija biomasėje buvo esmingai didžiausia (vidutiniškai 381,40 g kg^{-1} SM). Palyginus vidutinius dvejų metų skirtingų pjūčių duomenis nustatyta, kad hemiceliuliozės koncentracijos kitimo dinamika biomasėje buvo priešinga celiuliozės kitimo dinamikai. Didžiausia hemiceliuliozės koncentracija nustatyta pirmoje pjūtyje (194 m. d.) (vidutiniškai 313,50 g kg^{-1} SM). Vėlesnėse pjūtyse hemiceliuliozės koncentracija biomasėje sumažėjo nuo 5,18 % iki 10,50 %. Hemiceliuliozė yra ląstelių sienelių sudedamoji dalis. Tačiau, šis polisacharidas nepasižymi tokiu cheminiu inertiškumu, koks

būdingas celiuliozei. Citazės pagalba augalai lengvai suskaido hemiceliuliozę iki įvairių cukrų. Pavyzdžiui, sėkloms dygstant ląstelių sienelės suplonėja dėl hemiceliuliozę sudarančių angliavandenių sunaudojimo gemalui maitinti. Šiuo atžvilgiu hemiceliuliozė yra analogiška krakmolui (Dagys, 1985). Tikėtina, kad sėkloms bręstant šie angliavandeniai naudojami kaip rezervinės medžiagos, o augalų vegetacijai baigiantis ir ruošiantis žiemai – jie išgabenami į požeminius organus. Augalams senstant ląstelių sienelėse esančią hemiceliuliozę pakeičia ligninas (Allison et al., 2012). Tai paaiškina, kodėl tyrimų metais vėlinant pjūtis hemiceliuliozės koncentracija biomasėje mažėjo.

A. Monti et al. (2008) nustatė, kad augalų morfologinių struktūrų biomasės kokybė skiriasi. Tai patvirtina ir šio darbo rezultatai. Lignoceliuliozės frakcinės sudėties (ADL, hemiceliuliozės ir celiuliozės) vertės skirtingose augalų dalyse esmingai skyrėsi ($F_{fakt.}$ = 96,57, $F_{fakt.}$ = 13,74, $F_{fakt.}$ = 23,71; p = 0,001 atitinkamai), o genotipo (veislės) įtaka minėtiems biomasės kokybės komponentams buvo neesminė. Vidutiniai dvejų metų duomenys parodė, kad augalus nupjovus vegetacijos sezono pabaigoje labiausiai lignifikuoti buvo augalų stiebai (vidutiniškai 91,16 g kg^{-1} SM), lyginant su žiedynais (vidutiniškai 78,93 g kg^{-1} SM) ir lapais (vidutiniškai 49,43 g kg^{-1} SM) (30 pav.).



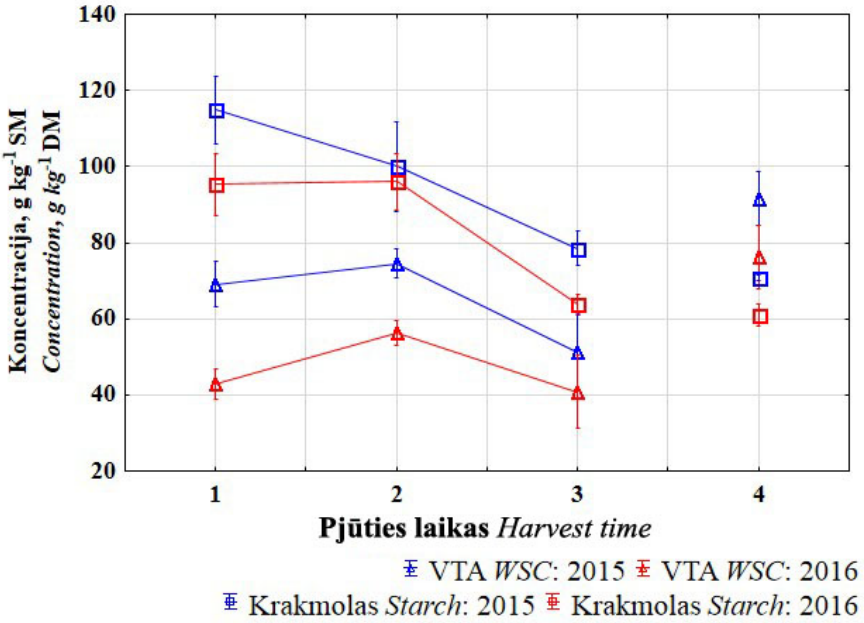
30 paveikslas. Lignoceliuliozės (NDF) frakcinė sudėtis (%) rykštinės soros lapų, stiebų ir žiedynų biomasėje augalus nupjovus vegetacijos sezono pabaigoje, 2015–2016 m. Grafike pažymėtos standartinės paklaidos

Figure 30. Fractional composition (%) of lignocellulose (NDF) in switchgrass stems, leaves and panicles biomass when plants were harvested at the end of vegetation season in 2015–2016. Error bars indicate standard error of the mean

Kitos lignoceliuliozės frakcijos, t. y. hemiceliuliozė ir celiuliozė, stiebuose sudarė 41,22 % ir 51,56 %, lapuose – 37,04 % ir 51,76 %, žiedynuose – 36,41 % ir 51,79 % ati-

tinkamai. Celiuliozė ir hemiceliuliozė stiebuose sudarė daugiau negu 86 % $\sum CH_2O$ visų angliavandenių sumos (30 pav.). Todėl rykštinės soros augalų stiebai sėklų brendimo ar senėjimo tarpsnyje galėtų būti tinkama žaliava antros kartos bioetanolio ir kietojo biokuro gamybai.

Norint gauti didelę metano išeigą iš augalinės biomasės, be optimalaus C:N santykio, biomasės sudėtyje turi būti mažai lignino ir daug lengvai skaidomų komponentų (nestruktūrinių angliavandenių ir tirpių ląstelės komponentų) (Amon et al., 2007; Seppälä et al., 2009). Šio darbo rezultatai parodė, kad nestruktūrinių angliavandenių, t. y. vandenyje tirpių angliavandenių (VTA) bei krakmolo koncentracijos biomasėje esmingai kito priklausomai nuo metų ir pjūties laiko (2 priedas). Nestruktūriniai angliavandeniai yra labai mobilūs junginiai. Kaip pirminiai fotosintezės metabolitai, jų kiekis augalo biomasėje įvairuoja priklausomai nuo apšvietimo, temperatūros ir kitų veiksnių (Shewmaker et al., 2006). Rykštinės soros augalų biomasėje vidutinė VTA ir krakmolo koncentracija pirmais metais buvo didesnė nei antrais metais (vidutiniškai 32,48 % 15,02 % atitinkamai). Nors pirmos pjūties (194 m. d.) ir atolo biomasėje C:N santykis buvo gerokai didesnis už optimalų biodujų gamybai, svarbu tai, kad šių pjūčių biomasė buvo mažai lignifikuota ir turėjo daug nestruktūrinių angliavandenių (31 pav.).



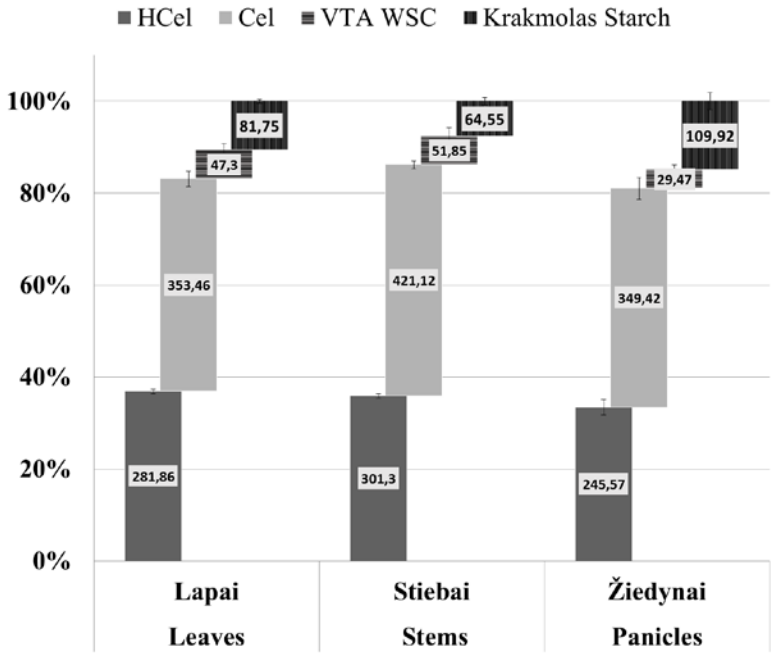
31 paveikslas. VTA ir krakmolo koncentracija skirtingų pjūčių rykštinės soros antžeminėje biomasėje, 2015 ir 2016 m. Pjūčių laikas išreikštas metų diena nuo sausio 1 d.: 1 – 194; 2 – 216 ir 221; 3 – 279 ir 277; 4 – atolas po pirmos pjūties. Grafike pažymėtos standartinės paklaidos

Figure 31. The concentration of WSC and starch in switchgrass aboveground biomass at different harvest time in 2015 and 2016. Harvest time is expressed as day of year after 1 January: 1 – 194; 2 – 216 and 221; 3 – 279 and 277; 4 – aftermath from first cut. Error bars indicate standard error of the mean

Remiantis dvejų metų duomenimis nustatyta, kad VTA ir krakmolo suma pirmos pjūties biomasėje vidutiniškai siekė 161,04 g kg^{-1} SM, o tai yra maždaug 7,10 % daugiau negu atole. Pažymėtina ir tai, kad pirmos pjūties (194 m. d.) biomasėje vyravo krakmolas (vidutiniškai 105,06 g kg^{-1} SM), o atole – VTA (vidutiniškai 83,91 g kg^{-1} SM). Apibendrinus matyti, kad šių pjūčių biomasė turėjo biodujų gamybai tinkamus kokybės požymius (daug fermentais lengvai skaidomo krakmolo ir VTA), o C:N santykį galima subalansuoti į žaliavą pridėjus azotingų medžiagų.

Rykštinės soros augalai nupjauti spalio pradžioje (279 ir 277 m. d.) pagal biomasės cheminę sudėtį buvo mažiausiai tinkami biodujų gamybai, tačiau pasižymėjo nemaža struktūrinių ir nestruktūrinių angliavandenių suma $\sum CH_2O$ (vidutiniškai 78,24 % SM), kuri buvo 3,99 % mažesnė nei pirmos pjūties biomasėje, 3,85 % mažesnė nei antros pjūties biomasėje ir 3,42 % didesnė nei atolo biomasėje. Kadangi spalio pradžioje rykštinės soros derlius buvo didžiausias (23 pav.), tokie šios biomasės sudėties ypatumai galėtų būti itin patrauklūs ją perdirbant į antros kartos bioetanolį.

Remiantis dvejų metų duomenimis nustatyta, kad vegetacijos sezono pabaigoje nestruktūriniai angliavandeniai lapuose, sudarė vidutiniškai 16,88 % $\sum CH_2O$, o stiebuose – 13,87 % $\sum CH_2O$ (32 pav.). Žiedynai išsiskyrė didžiausiu nestruktūrinių angliavandenių kiekiu (vidutiniškai 139,39 g kg^{-1} SM arba 18,98 % $\sum CH_2O$). Vyraujantis nestruktūrinis angliavandenis žiedynuose buvo krakmolas, kur jį, kaip atsarginę maisto medžiagą, kaupė sėklos.



32 paveikslas. Vidutinė angliavandenių ($\sum CH_2O$) frakcinė sudėtis rykštinės soros lapų, stiebų ir žiedynų biomasėje augalus nupjovus vegetacijos sezono pabaigoje, 2015–2016 m. Klaidų juostos rodo vidurkio paklaidą

Figure 32. The average fractional composition of carbohydrates ($\sum CH_2O$) in switchgrass stems, leaves and panicles biomass when plants were harvested at the end of vegetation season in 2015–2016. Error bars indicate standard error of the mean

Apibendrinimas. *Klasono lignino koncentracija biomasėje labiausiai priklausė nuo pjūties laiko. Vėlinant pjūties laiką lignino koncentracija biomasėje didėjo, o biomasėje nupjautoje žiemos pradžioje (337 ir 333 m. d.) ji buvo didžiausia (vidutiniškai 226,17 g kg^{-1} SM). Biomasė nupjauta vegetacijos sezono pabaigoje (279 – 277 m. d.) turėjo didžiausias koncentracijas ADF ir NDF (vidutiniškai 456,33 g kg^{-1} SM ir 740,16 g kg^{-1} SM atitinkamai).*

Tyrimų metais vėlinant pjūtis celiuliozės sankaupos didėjo. Jauniausiuose pagal brandą augaluose celiuliozės koncentracija buvo mažiausia (vidutiniškai 340,55 g kg^{-1} SM). Rykštinės soros augalų biomasėje vegetacijos sezono pabaigoje (279 – 277 m. d.) celiuliozės koncentracija buvo esmingai didžiausia (vidutiniškai 381,4 g kg^{-1} SM). Didžiausia hemiceliuliozės koncentracija nustatyta pirmoje, t. y. liepos mėnesio, pjūtyje (313,5 g kg^{-1} SM). Vėlesnėse pjūtyse hemiceliuliozės koncentracija biomasėje mažėjo. Lignoceliuliozės komponentų koncentracijos skirtingose augalo morfologinėse dalyse esmingai skyrėsi. Nustatyta, kad vegetacijos sezono pabaigoje augalų stiebų biomasė buvo labiausiai lignifikuota. Celiuliozė ir hemiceliuliozė stiebuose sudarė daugiau negu 86 % $\sum CH_2O$.

Nestruktūrinių angliavandenių koncentracija biomasėje priklausė nuo metų bei pjūties laiko. Pirmais derliaus metais augalų biomasė buvo turtingesnė VTA bei krakmolo nei antrais metais. Remiantis vidutiniais dvejų metų duomenimis nustatyta, kad pirmos pjūties (194 m. d.) biomasėje didžiausia buvo krakmolo koncentracija (vidutiniškai 105,06 g kg^{-1} SM), o atole – VTA koncentracija (vidutiniškai 83,91 g kg^{-1} SM). Vegetacijos sezono pabaigoje didesnes nestruktūrinių angliavandenių koncentracijas turėjo žiedynai ir lapai (18,98 % ir 16,88 % atitinkamai).

Ankstyvų pjūčių rykštinės soros biomasė galėtų tikti biodujų gamybai, pašarui ar kompostavimui, nes sukaupė vidutiniškai daugiau N, $\sum CH_2O$, taip pat turėjo mažiausią C:N santykio vertę lyginant su vėlesnių pjūčių biomase. Atolo biomasė, vertinant ją kaip žaliavą biodujoms, pagal cheminę sudėtį buvo prastesnės kokybės negu pirmos pjūties biomasė. Pjūties vėlinimas turėjo teigiamos įtakos rykštinės soros biomasės, kaip kietojo kuro, kokybei. Todėl augalai, ypač jų stiebai, pasiekę sėklų brendimo ar senėjimo tarpsnį, galėtų būti tinkama žaliava antros kartos bioetanolio ir kietojo biokuro gamybai.

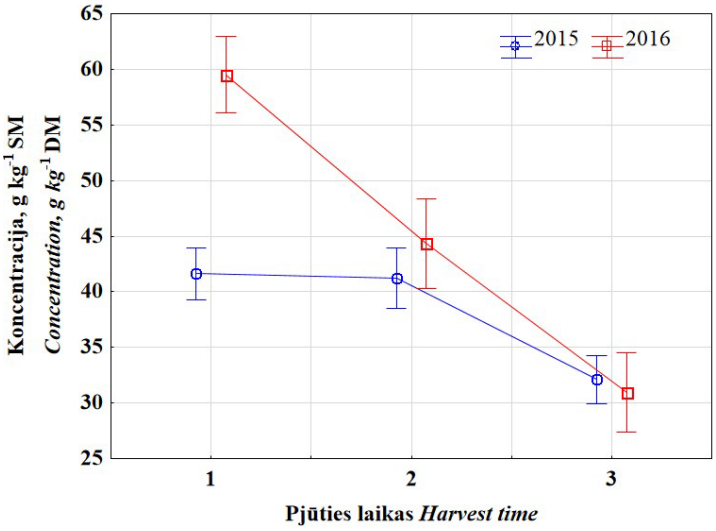
3.3.3. Rykštinės soros mineralinė biomasės sudėtis

Žolinių augalų biomasė yra alternatyvi žaliava papildanti tradicinius kietojo kuro resursus, tačiau šios biomasės kokybė pasižymi kai kuriais nepageidaujamais bruožais. Žolinės biomasės degimo metu neišvengiamai susidaro didesni pelenų kiekiai (Ogden et al., 2010), o nedegiosios mineralinės priemaišos mažina kuro degimo šilumą, mažina kūryklos ir katilo darbo ekonomiškumą bei našumą, sukelia koroziją, šlakų susidarymą, katilų užsiteršimą (Adler et al., 2006; Szemmelveisz et al., 2009). Nepageidaujamos teršalų emisijos taip pat yra susijusios su žolynų biomasės deginimu. Todėl šioje dalyje dėmesys buvo sutelktas į rykštinės soros biomasės mineralinius komponentus, kurie turi įtakos oro taršai, deginimo įrangos korozijai bei šlakų sankaupoms.

Biomasės peleningumas. Biomasės pelenai yra organinių ir neorganinių medžiagų likutis, susidaręs degimo proceso metu. Kuro peleningumas priklauso nuo mineralinių medžiagų (P, K, Na, Cl, Si ir kt.), esančių kuro masėje arba patenkančių į kurą jį ruošiant, transportuojant, sandėliuojant. Kuro peleningumas ir pelenų savybės turi didelės įtakos deginimo katilų eksploatavimui ir degimo proceso efektyvumui (Pedišius ir kt., 2016).

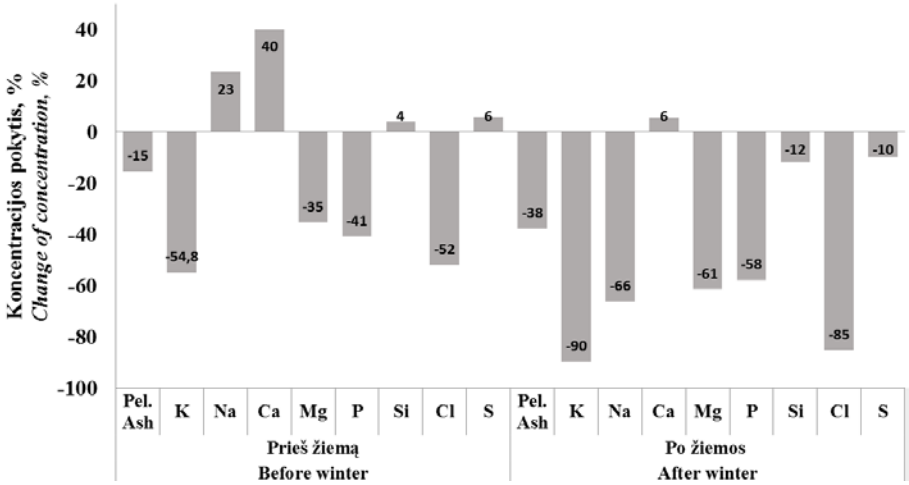
Tyrimų metu nustatyta, kad rykštinės soros biomasės peleningumas esmingai priklauso nuo metų, pjūties laiko ir šių veiksnių sąveikos įtakos (2 priedas).

Pirmų derliaus metų (nepriklausomai nuo pjūties laiko) vidutinė pelenų koncentracija biomasėje buvo 38,32 g kg^{-1} SM, t. y. 14,73 % mažesnė negu antrais metais (33 pav.).



33 paveikslas. Rykštinės soros antžeminės biomasės pelenų koncentracija skirtingose pjūtyse, 2015 ir 2016 m. Pjūčių laikas išreikštas metų diena nuo sausio 1 d.: 1 – 279 ir 277; 2 – 337 ir 333; 3 – 90 ir 91. Grafike pažymėtos standartinės paklaidos

Figure 33. The concentration of ash in switchgrass aboveground biomass at different harvest time in 2015 and 2016. Harvest time is expressed as day of year after 1 January: 1 – 279 and 277; 2 – 337 and 333; 3 – 90 and 91. Error bars indicate standard error of the mean

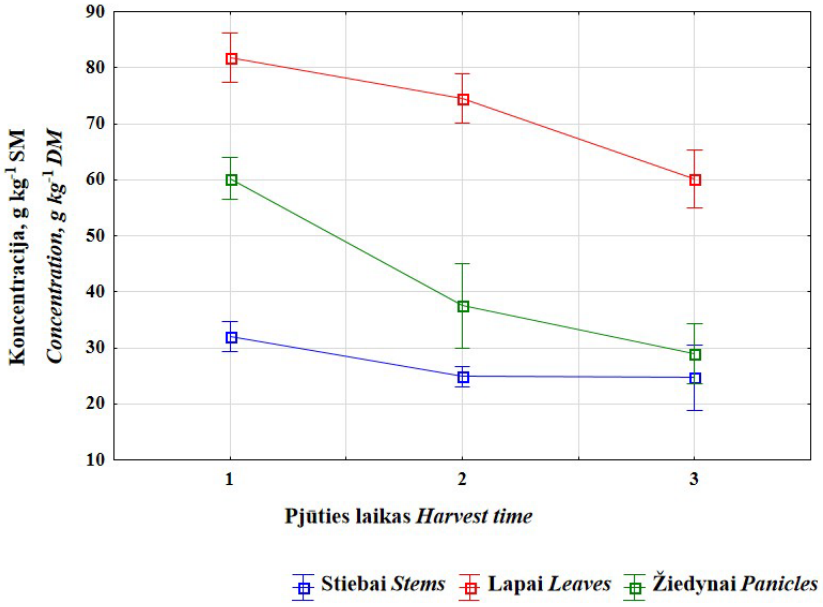


34 paveikslas. Rykštinės soros biomasės peleningumo ir mineralinių elementų koncentracijų pokytis nuo spalio iki gruodžio (prieš žiemą) ir kovo (po žiemos), 2015–2016 m.

Figure 34. The average change of ash and mineral elements in switchgrass biomass from October until early December (before winter) and early March (after winter) in 2015–2016

Dvejų tyrimo metų rezultatai parodė, kad pjūties vėlinimas esmingai mažino biomasės peleningumą: spalio mėnesį (279 ir 277 m. d.) peleningumas siekė vidutiniškai 50,57 g kg^{-1} SM, žiemos pradžioje (337 d. ir 333 m. d.) – vidutiniškai 42,80 g kg^{-1} SM, o po žiemos (90 ir 91 m. d.) – vidutiniškai 32,53 g kg^{-1} SM (33 pav.). Lyginant su spalio mėnesio pjūtimi, augalus nupjovus prieš žiemą ir pavasarį biomasės peleningumas sumažėjo 15,36 % ir 37,65 % atitinkamai (34 pav.).

Tiesioginiam deginimui yra tinkamesni augalai ir jų dalys su mažesnėmis mineralinių medžiagų koncentracijomis, nes didelė pelenų ir jų komponentų koncentracija biokure gali sukelti degimo krosnyse šlakų susidarymą ir jų užsiteršimą (Monti et al., 2008). Remiantis vidutiniais dvejų metų duomenimis, nustatyta, kad stiebų peleningumas buvo mažiausias arba 62,33 % mažesnis nei lapų ir 44,08 % – nei žiedynų (35 pav.). Spalio mėnesio pjūtyje stiebų peleningumas siekė vidutiniškai 31,99 g kg^{-1} SM. Lyginant su šia pjūtimi, stiebų ir žiedynų biomasės peleningumas po žiemos sumažėjo 22,78 % ir 51,88 % (vidutiniškai 24,70 ir 28,98 g kg^{-1} SM atitinkamai). Tačiau tarpusavyje šių struktūrinių dalių peleningumas esmingai nesiskyrė. Lapų peleningumas visose pjūtyse buvo didžiausias (35 pav.). Dvejų tyrimo metų rezultatai parodė, kad vėlinant pjūtis pelenų koncentracija lapuose sumažėjo nuo 8,85 % iki 26,43 %.



35 paveikslas. Rykštinės soros biomasės morfologinių frakcijų peleningumas skirtingose pjūtyse, 2015–2016 m. Pjūčių laikas išreikštas metų diena nuo sausio 1 d.: 1 – 279 ir 277; 2 – 337 ir 333; 3 – 90 ir 91. Grafike pažymėtos standartinės paklaidos

Figure 35. The concentration of ash in switchgrass biomass morphological fractions at different harvest time in 2015–2016. Harvest time is expressed as day of year after 1 January: 1 – 279 and 277; 2 – 337 and 333; 3 – 90 and 91. Error bars indicate standard error of the mean

Biomasės mineralinė sudėtis. Antžeminės biomasės mineralinė sudėtis labiausiai kito vėlinant pjūtis, tačiau priklausė ir nuo metų. Pavyzdžiui, K, Na, Ca, Mg, Cl ir S koncentracijos biomasėje esmingai kito priklausomai nuo pjūties laiko ir metų (2 priedas). P

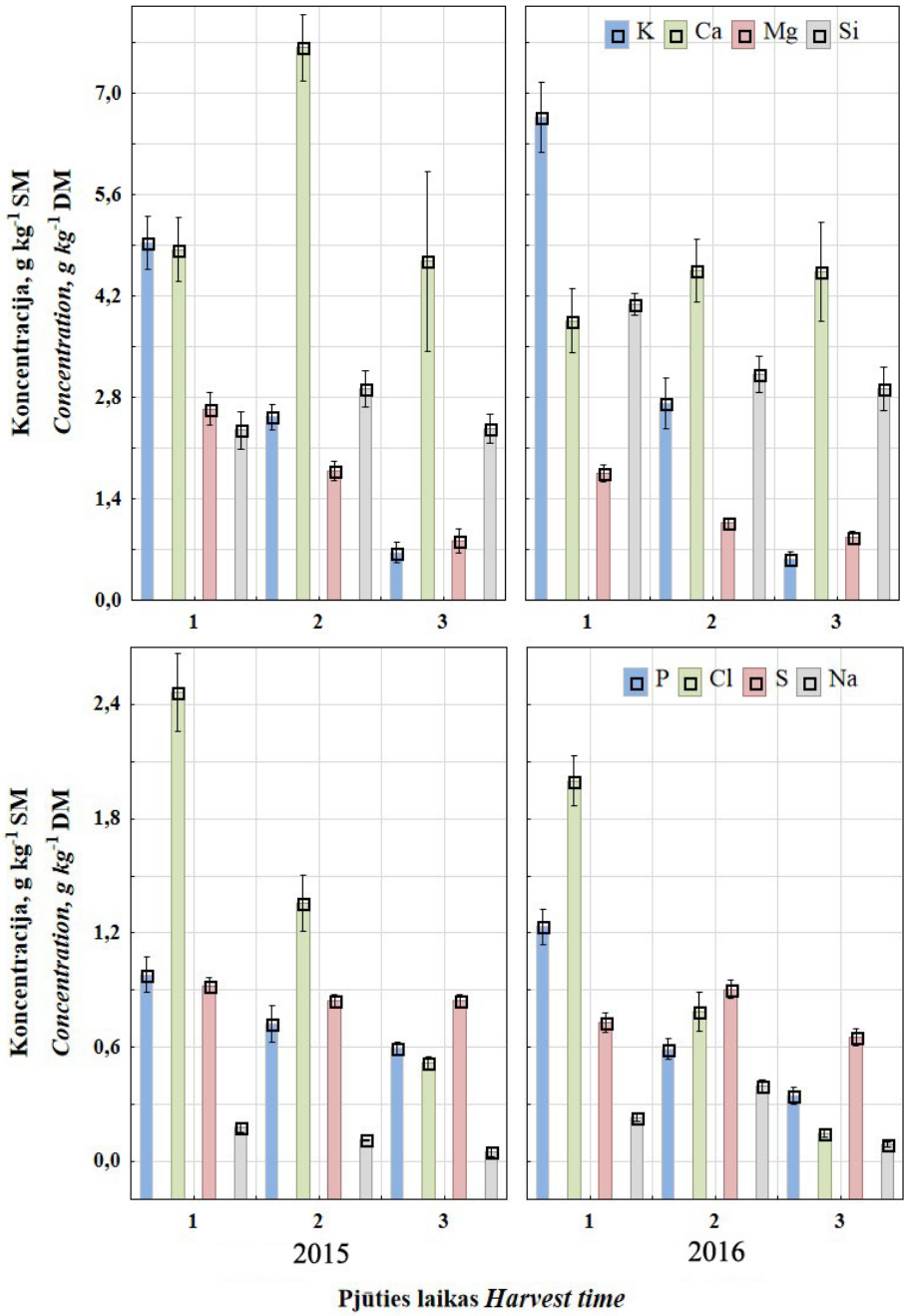
koncentracija atskirais derliaus metais buvo panaši, tačiau esminiai skirtumai nustatyti skirtingų pjūčių biomasėje (2 priedas). Priešinga tendencija nustatyta Si koncentracijos kitime: skirtingų pjūčių biomasėje šio elemento koncentracija buvo pasiskirsčiusi maždaug vienodai, tačiau esmingai kito skirtingais metais (2 priedas). R. Lemus et al. (2002) nurodo, kad rykštinės soros biomasės cheminės sudėties pokyčiai atskirais metais yra didesni nei skirtumai tarp genotipų. Mūsų tyrimų duomenimis K, Ca, ir S koncentracijos atskirų veislių biomasėje esmingai skyrėsi ($F_{fakt.}$ = 4,32; 3,99; 7,76; p = 0,001 atitinkamai), o likusiems tirtiems mineralinės sudėties elementams šis veiksnys esminės įtakos neturėjo.

Dvejų tyrimų metų (2015–2016 m.) rezultatai parodė, kad rykštinės soros biomasė, nupjauta vegetacijos sezono pabaigoje, turėjo tokias vidutines K, Na, Ca, Mg, P, Cl, Si, S koncentracijas: atitinkamai 5,80; 0,17; 4,35; 2,19; 1,10; 2,23; 2,86 ir 0,82 g kg^{-1} SM (36 pav.).

Palyginus biomasės mineralinių elementų kitimą atskirais derliaus metais nustatyta, kad didėjant žolių amžiui Mg, S, Ca ir Cl koncentracijos mažėjo (35,78 %; 11,62 %; 26,82 %; 32,63 % atitinkamai), o K, Na, Si ir P – didėjo (32,67 %; 109,09 %; 8,88 %, 5,75 % atitinkamai) (36 pav.).

Vėlinant pjūtį, antžeminėje biomasėje nustatyti dideli K ir Cl koncentracijų pokyčiai: nuo spalio (279 ir 277 m. d.) iki kovo (90 ir 91 m. d.) K koncentracija sumažėjo vidutiniškai 89,60 %, o Cl – 85,2 % (34 pav.). Panašiai nustatė ir P. R. Adler et al. (2006) konstatuodami, kad vėlinant pjūtis K ir Cl koncentracijos biomasėje sumažėja labiausiai. K ir Cl yra ląstelių sulčių komponentai, t. y. tirpios neorganinės druskos. Todėl augalams senėjant jų pernaša iš vienų audinių į kitus ar išsiplovimas žiemos laikotarpiu yra lengvesnis lyginant su kitais mineraliniais elementais. Biomasėje Cl, K ir P koncentracijų sumažėjimas yra labai svarbus, nes kuo šių elementų yra mažiau, tuo biomasės, kaip žaliavos kietajam biokurui, kokybė yra geresnė. Visi šie elementai yra susiję su korozijos procesais krosnyse, mažina pelenų lydymosi tašką, sudaro šlakus, nuodegas, apnašas ir lakiąsias medžiagas (Obernberger et al., 2006). Remiantis vidutiniais dvejų metų duomenimis nustatyta, kad spalyje (279 ir 277 m. d. arba BBCH 8 – 9) P koncentracija biomasėje buvo 1,10 g kg^{-1} SM, o kovą (90 ir 91 d.) šio elemnto koncentrcija sumažėjo iki 0,46 g kg^{-1} SM arba 58,18 % (34 pav.). Augalams senstant rudenį, daugelis mineralų iš vienmečių audinių (lapų, stiebų, žiedynų) yra pernešami į daugiamečius audinius, t. y. šaknis (Kludze et al., 2011; Ashworth et al., 2017).

Šarminių ir žemės šarminių mineralų (Mg, Ca ir Na) fosfatai ir sulfatai yra vieni iš pagrindinių komponentų, lemiančių pelenų lydymosi temperatūrą ir formuojančių katilų ar kaminų paviršių apnašas (Obernberger et al., 2006). Dvejų tyrimo metų rezultatai parodė, kad Mg ir Na koncentracijos antžeminėje biomasėje nuo spalio (279 ir 277 m. d.) iki kovo (90 ir 91 m. d.) sumažėjo vidutiniškai 61,64 % ir 70 % atitinkamai. Abiem tyrimų metais vėlinant pjūtis Mg koncentracija palaipsniui mažėjo. Kitokia kitimo dinamika buvo Na koncentracijos: pirmais metais vėlinant pjūtis Na koncentracija biomasėje nuosekliai mažėjo, o antrais metais gruodžio mėnesį (333 m. d.) Na koncentracija buvo esmingai didesnė (0,39 g kg^{-1} SM) nei ankstyvenėse pjūtyse. Antrais metais nuo spalio (279 ir 277 m. d.) iki gruodžio pradžios (337 ir 333 m. d.) rykštinės soros biomasėje Na koncentracija padidėjo vidutiniškai 69,56 % (36 pav.).



36 paveikslas. Rykštinės soros antžeminės biomasės mineralinė sudėtis skirtingose pjūtyse, 2015 ir 2016 m. Pjūčių laikas išreikštas metų diena nuo sausio 1 d.: 1 – 279 ir 277; 2 – 337 ir 333; 3 – 90 ir 91. Grafike pažymėtos standartinės paklaidos

Figure 36. The concentrations of inorganic elements in switchgrass aboveground biomass at different harvest time in 2015 and 2016. Harvest time is expressed as day of year after 1 January: 1 – 279 and 277; 2 – 337 and 333; 3 – 90 and 91. Error bars indicate standard error of the mean

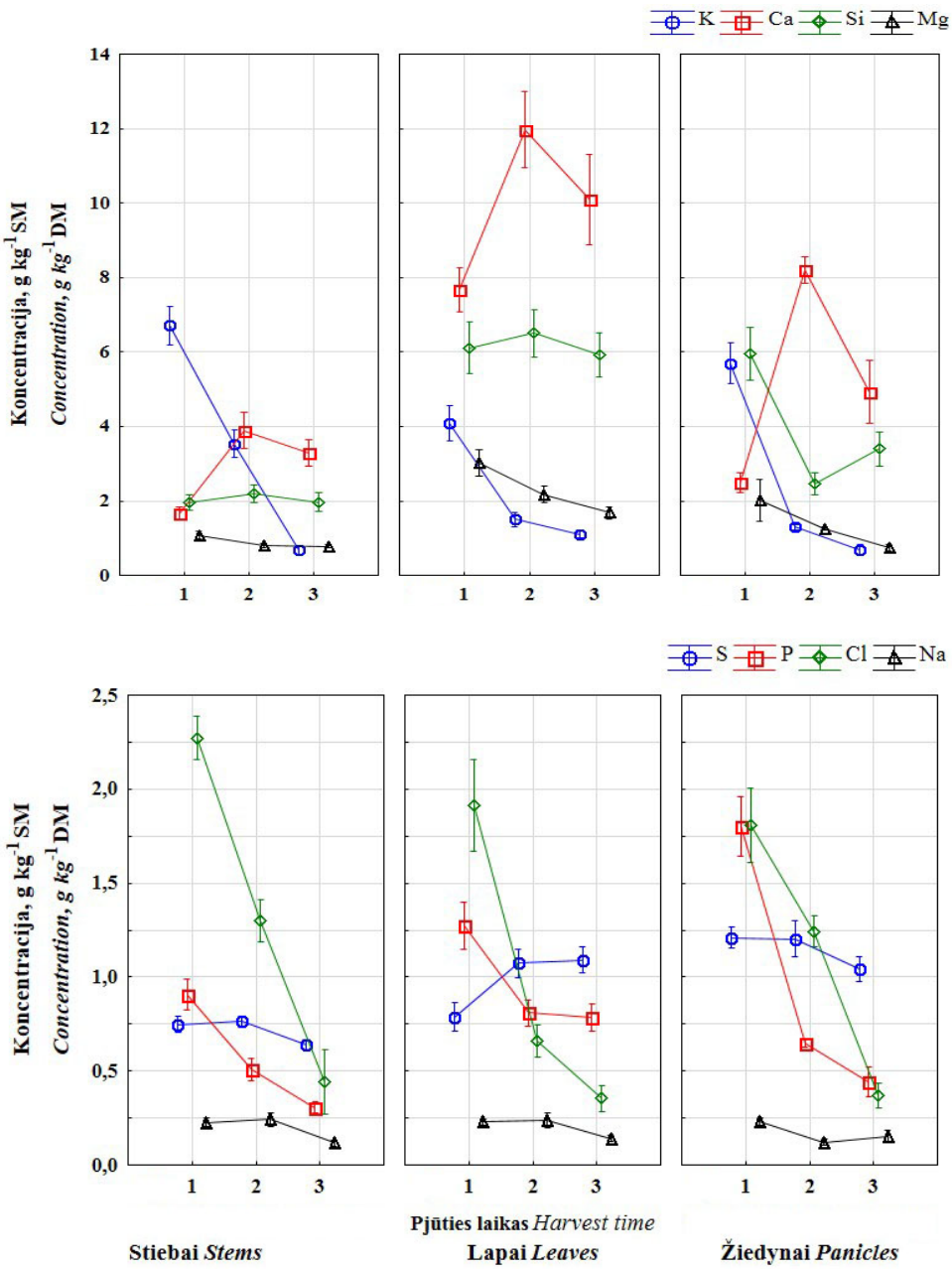
Si oksidai, kartu su K ir Na oksidais yra pagrindiniai aglomeracijos ir katilo „užsiteršimo“ sukėlėjai, nes didėjant šių elementų kiekiui, mažėja pelenų lydumo temperatūros (Pedišius ir kt., 2016). Šiame tyrime dispersinė analizė parodė, kad rykštinės soros biomasėje Si koncentracija priklauso nuo metų, o pjūties laikas esminės įtakos neturi (2 priedas). Pirmų metų biomasėje (nepriklausomai nuo pjūties laiko) vidutinė Si koncentracija buvo 2,54 g kg^{-1} SM, antrais derliaus metais – ji padidėjo 32,67 % (vidutiniškai 3,37 g kg^{-1} SM). Vidutiniai dvejų metų duomenys parodė, kad skirtingose pjūtyse Si koncentracija kito nežymiai, tačiau didžiausia koncentracija nustatyta biomasę nupjovus gruodžio mėnesį (2,97 g kg^{-1} SM) (36 pav.).

Rykštinės soros biomasė turėjo gana didelę Ca koncentraciją. Dispersinė analizė parodė, kad Ca koncentracija esminiai kito priklausomai nuo pjūties laiko, metų ir šių veiksnių sąveikos įtakos (2 priedas). Pavyzdžiui, 2015 m. biomasę nupjovus 337 m. d. Ca koncentracija joje buvo esmingai didžiausia (7,63 g kg^{-1} SM) (36 pav.), o 2016 m. panašiu metu (333 m. d.) – Ca koncentracija tesiekė 4,55 g kg^{-1} SM.

Skirtingų rykštinės soros veislių biomasės Ca koncentracija statistiškai patikimai skyrėsi ($F_{fakt.}$ = 5,93; p = 0,001). Remiantis dvejų tyrimo metų rezultatais nustatyta, kad nepriklausomai nuo pjovimo laiko didžiausią Ca koncentraciją turėjo ankstyviausia veislė 'Dacotah' (vidutiniškai 6,14 g kg^{-1} SM), o vėlyvesnių veislių 'Forestburg' ir 'Cave in Rock' bei hibridinės populiacijos Ca koncentracija buvo nuo 14,98 % iki 32,74 % mažesnė. Literatūroje nurodoma, kad augalų ląstelių senėjimą lydi Ca kaupimasis periferiniuose citoplazmos sluoksniuose. Tai didina protoplazmos klampumą ir turi įtakos jos laidumui. Manoma, kad kalcio tirpiųjų junginių susidarymas senstančiose augalų ląstelėse yra prisitaikymas, normalizuojantis jų medžiagų apykaitą (Brazytė-Gorochovienė ir kt., 2004).

Degimo įrangai didelį poveikį daro S esanti kure. Kuo S koncentracija mažesnė, tuo mažiau degimo proceso metu susidaro sieros rūgšties anhidrido, be to mažesnė ir SO_2 emisija. I. Obernberger et al. (2006) rekomenduoja, kad S koncentracija sausoje kuro biomasėje būtų ne didesnė nei 2 g kg^{-1}. Šio tyrimo rezultatai parodė, kad S koncentracija rykštinės soros biomasėje neviršijo rekomenduojamos normos. Dvejų tyrimo metų duomenys parodė, kad vidutinė S koncentracija (nepriklausomai nuo pjūties laiko) pirmų metų biomasėje buvo 0,86 g kg^{-1} SM, o antrų – 0,76 g kg^{-1} SM. S koncentracija esmingai kito priklausomai nuo metų meteorologinių sąlygų, pjūties laiko bei šių veiksnių saveikos įtakos (2 priedas). Pirmais derliaus metais esminiai didžiausia S koncentracija biomasėje nustatyta spalyje (vidutiniškai 0,92 g kg^{-1} SM), o antrais metais – gruodžio pradžioje (vidutiniškai 0,90 g kg^{-1} SM) (36 pav.). Kiti autoriai (Adler et al., 2006; Kludze et al., 2011) nurodo, kad S koncentracija rykštinės soros biomasėje nuo pjūties laiko nepriklauso.

Remiantis vidutiniais dvejų metų rezultatais nustatyta, kad stiebų biomasėje pelenų, Mg, Si, P ir S koncentracijos daugumoje pjūčių buvo esmingai mažesnės nei lapuose ir žiedynuose (35, 37 pav.). Žiedynuose vidutinė S koncentracija buvo esminiai didžiausia (vidutiniškai 1,17 g kg^{-1} SM), nei kitose augalo dalyse. Žiedynų biomasėje nustatyta ir didesnė P koncentracija (vidutiniškai 1,55 g kg^{-1} SM). Tai gali būti susiję su tuo, kad S įeina į baltymų, o P – į nukleorūgščių, ATP sudėtį, kurių daugiausiai kaupiasi sėklose. Lapuose buvo esminiai didžiausios pelenų (vidutiniškai 71,97 g kg^{-1} SM), Ca (vidutiniškai 10,02 g kg^{-1} SM), Mg (vidutiniškai 2,32 g kg^{-1} SM) ir Si (vidutiniškai 6,11 g kg^{-1} SM) koncentracijos. Vidutinė K ir Cl koncentracija stiebuose ir žiedynuose buvo panašių verčių (37 pav.). Na koncentracija buvo pasiskirsčiusi beveik vienodai visose augalo dalyse. Visgi, lapuose ir žiedynuose Na koncentracija buvo 5 % didesnė nei stiebuose, tačiau artimų verčių (37 pav.). Panašų pelenų ir mineralinių elementų pasiskirstymą augalų morfologinių struktūrų biomasėje publikuoja ir kiti autoriai (Monti et al., 2008).



37 paveikslas. K, Ca, Si, Mg, S, P, Cl, Na koncentracijos skirtingų pjūčių rykštinės soros morfologinių frakcijų biomasėje, 2015–2016 m. Pjūčių laikas išreikštas metų diena nuo sausio 1 d.: 1 – 279 ir 277; 2 – 337 ir 333; 3 – 90 ir 91. Grafike pažymėtos standartinės paklaidos

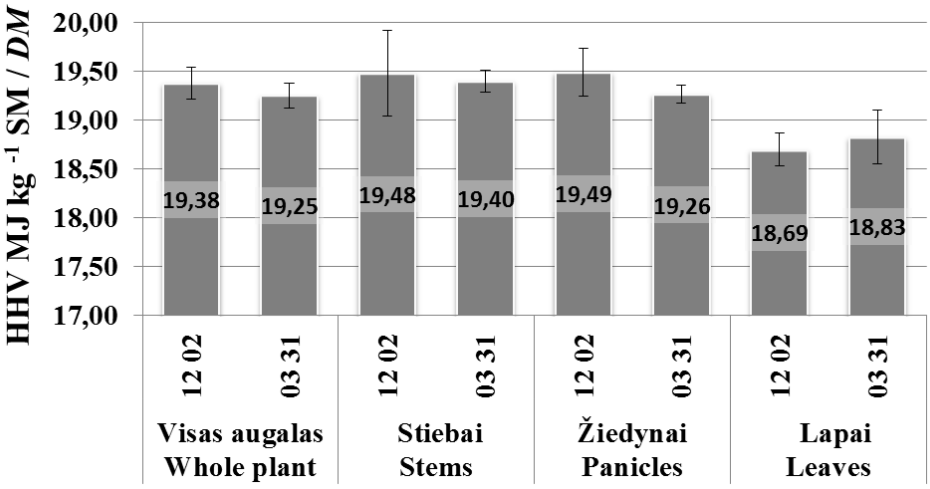
Figure 37. The concentration of K, Ca, Si, Mg, S, P, Cl, Na in the biomass of switchgrass morphological fractions at different harvest time in 2015–2016. Harvest time is expressed as day of year after 1 January: 1 – 279 and 277; 2 – 337 and 333; 3 – 90 and 91. Error bars indicate standard error of the mean

N. Pedišius su bendraautoriais (2016) nustatė, kad suminės vidutinės metalų koncentracijos šiauduose ir žoliniuose augaluose yra vidutiniškai 4 – 6 kartus didesnės nei medienoje. Svarbiausių metalų, lemiančių pelenų kiekį ir jų savybes, koncentracijos atskirose

biomasės rūšyse išsidėsto atitinkama mažėjančia seka: medienoje – Ca, K, Si, Mg, Na; javų šiauduose – Si, K, Ca, Mg, Na; žoliniuose augaluose – Si, Ca, K, Mg Na. Sugretinus minėtų autorių ir šio tyrimo rezultatus nustatyta, kad rykštinės soros biomasės vidutinė metalų koncentracijos suma yra nuo 4,7 kartų (rudeninėje pjūtyje) iki 2,5 kartų (po žiemos pavasarinėje pjūtyje) didesnė nei medienoje. Suminė metalų koncentracija rykštinės soros biomasėje spalyje yra 1,6 kartus didesnė nei kanapėse, tačiau 0,7–1,2 kartus mažesnė nei javų šiauduose ir kituose žoliniuose augaluose. Svarbu tai, kad rykštinės soros biomasėje, kaip ir medienoje, daugiausia yra Ca, o kitoje agromasėje (javų šiauduose, rapsų stiebuose) – vyrauja Si. Rykštinės soros biomasėje svarbiausių, peleningumą lemiančių, elementų vidutines koncentracijas būtų galima išdėstyti tokia mažėjančia seka: Ca, K, Si, Na, Mg, Cl, S, P. Lyginant rykštinės soros biomasę su mediena, didžiausi skirtumai išryškėja šių elementų koncentracijose: Mg (8,8 karto), Na (6,5 karto), Cl (3,8 karto), K (3,6 karto). Pagal nustatytą vidutinę S koncentraciją rykštinės soros biomasė artimiausia *Salix* genties rūšių biomasei (Jenkins et al., 1998). Rykštinės soros biomasėje pastebimai mažesnės S bei pelenų koncentracijos nei anglyje ar lignite (Jenkins et al., 1998; Vassilev et al., 2010).

Biomasės šiluminė vertė. Siekiant augalų biomasę naudoti energijos gaminimui, svarbu atkreipti dėmesį ir į jos šilumingumą, kuris koreliuoja su anglies kiekiu biomasėje. Literatūros duomenimis, medienos šilumingumas siekia beveik 19 MJ kg, šiaudų ir žolių – 16,5 ir 17,7 MJ kg atitinkamai (Pedišius ir kt., 2016). Tyrimo metu buvo nustatyta, kad rykštinės soros biomasės šilumingumas arba aukštutinė degimo šiluma (HHV) priklauso nuo augalo struktūrinių dalių ($F_{fakt.}$ = 3,87; p = 0,001), tačiau nepriklauso nuo pjovimo laiko ($F_{fakt.}$ = 0,37; p = 0,54) ir veislės ($F_{fakt.}$ = 1,57; p = 0,21).

Dvejų tyrimo metų rezultatai parodė, kad rykštinės soros antžeminės biomasės šiluminė vertė nepriklausomai nuo pjovimo laiko yra lygi 19,31 MJ kg^{-1} SM. Nuo gruodžio pradžios iki pavasario HHV sumažėjo vidutiniškai 0,67 %. Lyginant atskirų augalo struktūrinių dalių šiluminę vertę nustatyta, kad lapų biomasės HHV vertė buvo mažiausia, o stiebų ir žiedynų – kiekvieno pjovimo metu didžiausia (38 pav.).



38 paveikslas. Rykštinės soros biomasės šilumingumo arba aukštutinės degimo šilumos (HHV) vertės priklausomai nuo jos pjovimo laiko (gruodžio ir kovo mėn.) bei augalo morfologinės dalies. Grafike pažymėtos standartinės paklaidos

Figure 38. The change in the higher heating value (HHV) of switchgrass biomass depending on harvest time (in December and March) and morphological part of plant. Error bars indicate standard error of the mean

Pavasarį viso augalo biomasės, stiebų ir žiedynų biomasės HHV vertės buvo mažesnės nei žiemos pradžioje. Priešinga tendencija nustatyta lapuose (38 pav.). Tačiau biomasės HHV verčių skirtumai skirtingose pjūtyse buvo neesminiai. Pažymėtina tai, kad stiebų dalis biomasėje nuo gruodžio iki kovo mėnesio padidėjo 1,2 karto, o lapų dalis sumažėjo daugiau nei 3 kartus. Šių frakcijų santykio pokyčiai biokuro žaliavoje gali įtakoti jo šiluminę vertę.

Apibendrinimas. *Pirmais derliaus metais vidutinis rykštinės soros biomasės peleningumas buvo 14,73 % mažesnis negu antrais metais. Pjūties vėlinimas esmingai mažino pelenų koncentraciją biomasėje. Po žiemos, kovo mėnesį, biomasės peleningumas buvo mažiausias (32,53 g kg^{-1}). Lyginant atskiras augalo morfologines dalis nustatyta, kad stiebų peleningumas buvo mažiausias ir tesiekė 27,18 g kg^{-1} SM.*

Mineralinė antžeminės biomasės sudėtis labiausiai kito vėlinant pjūtis. Didžiausias sumažėjimas užfiksuotas K ir Cl koncentracijų kaitoje: nuo spalio iki kovo mėnesio K koncentracija sumažėjo net 89,60 %, o Cl koncentracija – 85,2 %. Spalio mėnesį P koncentracija rykštinės soros biomasėje siekė 1,10 g kg^{-1} SM, o kovą – ji sumažėjo 58,18 %. Mg ir Na koncentracijos antžeminėje biomasėje nuo spalio iki kovo sumažėjo 61,64 % ir 70 %. Didžiausia Ca koncentracija biomasėje nustatyta nupjovus ją prieš žiemą (vidutiniškai 6,09 g kg^{-1} SM). Pirmais derliaus metais didžiausia S koncentracija biomasėje nustatyta spalyje (vidutiniškai 0,92 g kg^{-1} SM), o antrais – gruodyje (vidutiniškai 0,90 g kg^{-1} SM). Si koncentracija skirtingų pjūčių biomasėje buvo pasiskirsčiusi maždaug tolygiai, tačiau skyrėsi priklausomai nuo metų: pirmais derliaus metais siekė vidutiniškai 2,54 g kg^{-1} SM, o antrais – 3,37 g kg^{-1} SM.

Stiebuose pelenų, Mg, Si, P ir S buvo mažiau nei lapuose ir žiedynuose. Lapai turėjo didžiausias pelenų, Ca, Mg ir Si koncentracijas, o sėklas subrandinusiose žiedynų šluotelėse buvo daugiau elementų, įeinančių į baltymų sudėtį. Vidutinės K ir Cl koncentracijos stiebuose ir žiedynuose buvo panašių verčių.

Rykštinės soros antžeminės biomasės vidutinė šiluminė vertė arba aukštutinė degimo šiluma (HHV) siekė 19,31 MJ kg^{-1} SM. Nuo gruodžio pradžios iki pavasario HHV sumažėjo 0,67 %. Atskirų augalo morfologinių dalių biomasės šilumingumas esminiai skyrėsi. Lapų biomasės šiluminė vertė buvo mažiausia (18,76 MJ kg^{-1} SM), o stiebų ir žiedynų biomasė kiekvieno pjovimo metu turėjo aukščiausią HHV.

3.3.4. Rykštinės soros populiacijų įvairovė pagal biomasės cheminę sudėtį ir agrobiologinius požymius

Atlikus rykštinės soros populiacijų pagrindinių komponenčių analizę pagal spalio mėnesį nupjautos biomasės cheminę sudėtį ir agrobiologinius požymius nustatyta, kad pirmos trys komponentės paaiškino 66,78 % tirtų požymių įvairovės (12 lentelė).

Pirmoji komponentė (PC1) aprašė 30,67 % duomenų dispersijos ir atitinkamai pagal tikrines vektorių vertes labiausiai buvo susijusi su N koncentracija bei C:N santykiu biomasėje ir populiacijų geografine kilme (12 lentelė). Stiebų-lapų santykis, stiebų procentas augale ir biomasės C:N santykis teigiamai koreliavo su populiacijų geografine kilme ir geriausiai atskyrė šiauresnių platumų populiacijas nuo pietesnių platumų (12 lentelė; 39 pav.).

Antroji komponentė (PC2) sudarė 21,26 % visos įvairovės ir sugrupavo populiacijas pagal biomasės ląstelienos (NDF, ADF) koncentraciją biomasėje, peleningumą ir VTA.

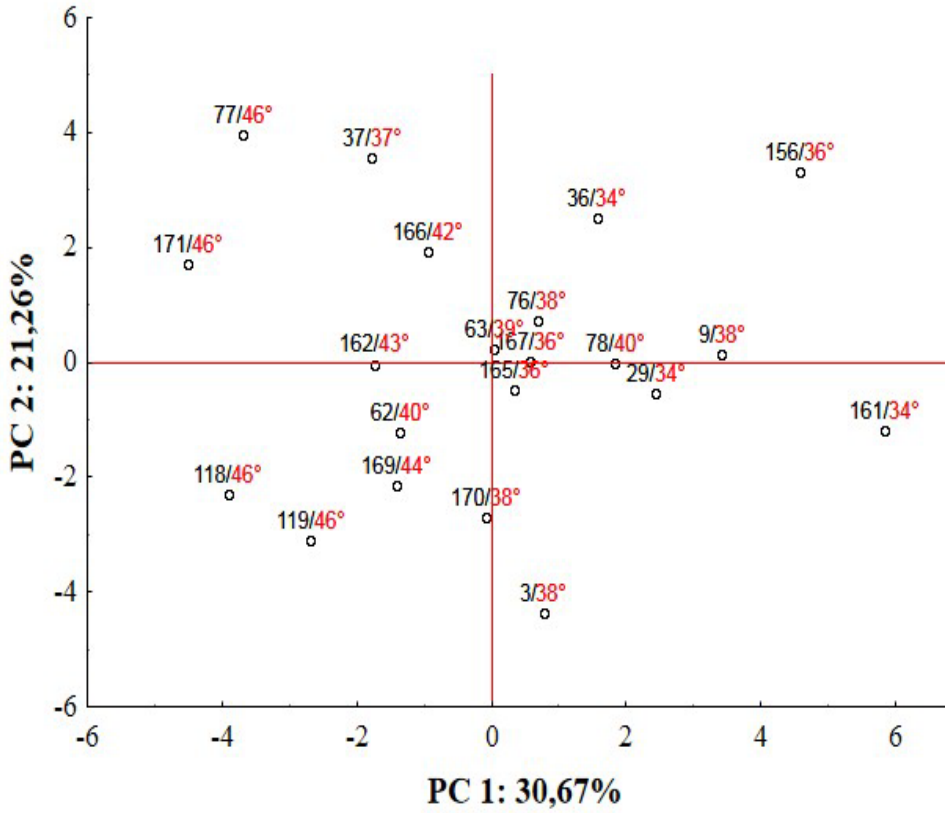
Trečioji komponentė (PC3) sudarė 14,85 % visos įvairovės ir buvo teigiamai susijusi su populiacijų augalų lapuotumu bei Klasono lignino koncentracija jų biomasėje, o neigiamai – su stiebų procentu bei stiebų-lapų santykiu augale.

12 lentelė. Rykštinės soros populiacijų (n = 21) pagrindinių komponenčių analizė pagal biomasės cheminę sudėtį ir agrobiologinius požymius

Table 12. Basic statistics of principal component analysis of switchgrass populations (n = 21) based on biomass chemical content and agrobiological traits

Požymiai ***Traits***	**Požymio galia** ***Power of trait***	**Požymio reikšmingumas** ***Importance of trait***	**PC1**	**PC2**	**PC3**
NDF	0,850	8	0,203	0,309	0,116
ADF	0,865	7	0,189	0,337	0,088
ADL	0,701	18	0,259	0,182	-0,080
Klasono ligninas *Klason lignin*	0,727	15	-0,046	0,214	0,341
VTA *WSC*	0,905	5	-0,220	-0,308	0,069
Krakmolas *Starch*	0,685	19	0,153	-0,260	-0,131
N	0,894	6	-0,343	0,036	-0,072
C	0,767	13	0,198	-0,298	-0,057
S	0,710	17	-0,266	-0,173	-0,098
C:N	0,918	3	0,331	-0,066	0,146
Žali pelenai *Ash*	0,806	10	-0,063	0,364	-0,159
K	0,535	22	-0,214	0,169	0,009
Na	0,794	11	-0,036	0,027	0,017
Ca	0,497	23	0,138	0,147	-0,263
Mg	0,314	24	-0,098	0,210	0,059
P	0,555	21	-0,265	0,069	-0,064
Si	0,713	16	0,127	0,276	-0,126
Cl	0,791	12	-0,200	0,309	0,025
Lapuotumas *Leafiness*	0,907	4	0,039	-0,061	0,495
Stiebų procentas augale *Percent of stems per plant*	0,946	2	0,141	-0,033	-0,390
Žiedynų procentas augale *Percent of inflorescences per plant*	0,816	9	-0,220	0,114	-0,139
Stiebų-lapų santykis *Stems-leaf ratio*	0,960	1	0,056	0,011	-0,492
Geografinė kilmė *Geographic origin*	0,739	14	0,305	-0,044	0,111
Plaukėjimo ankstyvumas *Day degree till heading*	0,576	20	-0,269	-0,024	0,071
Tikrinė vertė / *Eigen value*			7,361	5,102	3,565
Komponenčių variantiškumas, % / *Percentages of variance explained*, %			30,672	21,260	14,852
Kauptinis variantiškumas, % / *Cumulative variance*, %			30,672	51,933	66,785

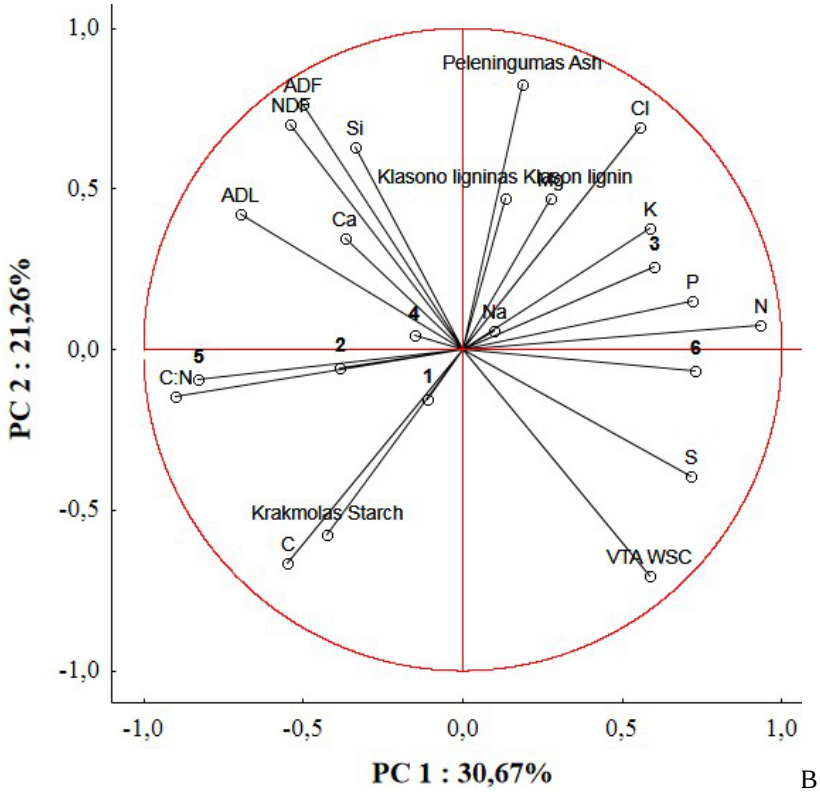
Rykštinės soros populiacijų, kilusių iš šiauresnių platumų, biomasėje spalio mėnesį buvo daugiau ląstelienos (Nr. 171 ir 77), didesnis C:N santykis bei didesnės C ir krakmolo koncentracijos (39, 40 pav.). Nestruktūrinių angliavandenių gausa išsiskyrė laukinės populiacijos Nr. 118, 119 ir veislė 'Cave in Rock' (Nr. 3), todėl jos labiausiai tiktų biodujų gamybai.



39 paveikslas. Rykštinės soros populiacijų (n = 21) skaida pagrindinių komponenčių erdvėje pagal biomasės kokybinę sudėtį ir agrobiologinius požymius. Populiacijų numeriai pažymėti juodai, o jų kilmės geografinė platuma – raudonai.

Figure 39. Principal component analysis of switchgrass populations (n = 21) based on biomass chemical content and agrobiological traits. Accessions numbers are presented in black and the latitude of their geographic origin – in red.

Pietesnių platumų populiacijų biomasėje nustatytos didesnės N, P, K, Cl, Mg, S koncentracijos. 40 paveikslas parodo, kad šie biomasės kokybiniai rodikliai teigiamai koreliavo su populiacijų plaukėjimo vėlyvumu. Labiausiai iš visų pietesnių platumų populiacijų išsiskyrė veislės 'Grenville' (Nr. 156) ir 'Kanlow' (Nr. 161), kurių žiemojimas Lietuvoje buvo prastesnis (8 B pav.). Tai patvirtina hipotezę, kad Lietuvoje vėlyvesnių rykštinės soros populiacijų augalai nespėja pernešti daugelį mineralinių elementų iš vienmečių audinių į šaknyną, dėl to nepasiruošia žiemos laikotarpiui ir yra neištvermingi žiemą.



B

40 paveikslas. Rykštinės soros biomasės kokybinės sudėties rodiklų ir agrobiologinių požymių sisteminiai ryšiai paremti pagrindinių komponenčių analize. 1 – lapuotumas, 2 – stiebų procentas augale, 3 – žiedynų procentas augale, 4 – stiebų-lapų santykis, 5 – geografinė kilmė, 6 – plaukėjimo ankstyvumas

Figure 40. Pattern of relations between indicators of switchgrass biomass chemical content and agrobiological traits. 1 – leafiness, 2 – percent of stems per plant, 3 – percent of inflorescences per plant, 4 – stems-leaf ratio, 5 – geographic origin, 6 – heading earliness.

Apibendrinimas. *Rykštinės soros genetinių išteklių pagrindinių komponenčių analizė atskleidė biomasės cheminės sudėties komponentų, agrobiologinių požymių ir populiacijų geografinės kilmės sąsajas. Stiebų-lapų santykis, stiebų procentas augale ir biomasės C:N santykis geriausiai padėjo atskirti šiauresnių platumų populiacijas nuo pietesnių platumų populiacijų. Analizė parodė, kad populiacijų, kilusių iš šiauresnių platumų, spalio mėnesį nupjauta biomasė turėjo daugiau ląstelienos, C ir krakmolo, didesnį C:N santykį, tuo tarpu pietesnių platumų populiacijų biomasė sukaupė didesnės N, P, K, Cl, Mg, S koncentracijas. Nustatyta, kad šie biomasės kokybės rodikliai buvo susiję ir su populiacijų plaukėjimo data. Pagrindinių komponenčių analizė palengvino rykštinės soros laukinių populiacijų ir veislių grupavimą pagal jų biomasės cheminės sudėties komponentus ir agrobiologinius požymius bei pagreitino genetinių išteklių, labiausiai tinkamų biodujų, antrosios kartos bioetanolio ar kietojo biokuro gamybai atrinkimą.*

IŠVADOS

1. Lietuvoje rykštinės soros laukinės populiacijos, kilusios iš Šiaurės Dakotos, pirmais ir vėlesniais žiemojimo metais išgyvena be pažeidimų, o genetiniai ištekliai iš piečiau esančių Šiaurės Amerikos regionų, žiemoja blogai arba neperžiemoja.
2. Rykštinės soros vegetacija Lietuvoje trunka vidutiniškai 160 dienų, o vystymasis nuo plaukėjimo pradžios iki sėklų brandos – vidutiniškai 80 dienų. Šios augalų rūšies savalaikės sėklų brandos (BBCH 8) šilumos optimumas yra vidutiniškai 735 – 960 efektyvių temperatūrų suma. Ankstyviausios rykštinės soros populiacijos sėklas subrandina rugsėjo pradžioje. Tačiau populiacijos kilusios piečiau nei 38° šiaurės platumos lygiagretės, visų brandos tarpsnių per vegetacijos laikotarpį pasiekti nespėja.
3. Rykštinė sora yra polimorfiška rūšis. Labiausiai kintantys požymiai yra stiebų skaičius kere, 1000 sėklų masė ir sėklų derlius, o stabiliausi – augalų aukštis ir kero diametras. Skirtingo ploidiškumo rykštinės soros populiacijos labiausiai skiriasi pagal vegetatyvinių stiebų skaičių kere ir augalų lapuotumą. Generatyvinių ūglių svoris ir stiebo diametras, kaip netiesioginiai augalų produktyvumo rodikliai, galėtų būti naudojami vertinant ir atrenkant populiacijas.
4. Rykštinės soros augalus pjaunant vieną kartą per sezoną, jų biomasės derlius kasmet didėja, o pjaunant du kartus – mažėja. Mišraus ploidiškumo bei oktaploidinės populiacijos užaugina daugiau biomasės nei tetraploidinės, o didžiausi biomasės derliaus skirtumai tarp ploidiškumo grupių nustatyti sausringais metais. Tai rodo, kad didesnio ploidiškumo populiacijos turi platesnę ekologinę amplitudę.
5. Pjovimo laikas yra svarbus veiksnys, lemiantis rykštinės soros biomasės derlių ir drėgnį. Vegetacijos sezono metu didžiausias biomasės sausųjų medžiagų derlius nustatytas spalio mėnesį (iki 5,97 t ha^{-1}). Pasibaigus vegetacijai, žiemą, biomasės derlius sumažėja 14 %, o ankstyvą pavasarį – net 51 %. Biomasės santykinis drėgnis žiemą yra 33 %, o pavasarį tik 14 %. Todėl biokuro gamybai optimaliausias rykštinės soros pjovimo laikas yra po šalnų, ar žiemos pradžioje.
6. Anksčiausiai, liepos mėnesį (BBCH 5), nupjauta rykštinės soros biomasė geriausiai tinka biodujų gamybai, pašarui ar kompostavimui, nes joje yra daugiau N ir $\sum CH_2O$, mažiau lignino, mažiausias C:N santykis lyginant su vėlesnių pjūčių biomase. Vėlinant pjūtis (BBCH 8 – 9) biomasės pelenų ir daugumos mineralinių elementų koncentracijos mažėja, tad augalai, pasiekę sėklų brendimo ar senėjimo tarpsnį, būtų tinkamesni kietojo biokuro gamybai. Jų biomasė tinkama ir antros kartos bioetanolio gamybai, nes tuo metu joje yra daugiausiai sukaupta lignoceliuliozės.
7. Stiebų biomasės peleningumas bei mineralinių elementų koncentracija yra mažiausia. Lapai pasižymi didžiausiomis Ca, Mg ir Si koncentracijomis, o sėklas subrandinusiuose žiedynuose yra daugiau P ir S. Cl ir Na koncentracijos augalo morfologinėse frakcijose pasiskirsto tolygiai.
8. Atrinktos rykštinės soros laukinės populiacijos (Nr. 23, 46, 57, 106, 113, 115, 116, 117, 118, 119 124, 130, 131) ir veislės 'Forestburg' bei 'Cave in Rock' gali papildyti energinių atsinaujinančių išteklių įvairovę Europos nemoralinėje zonoje. Taip pat šiuos genetinius išteklius galima panaudoti, kaip vertingus genų donorus, naujų, vietos sąlygomis adaptyvių, energinių veislių kūrimui.

LITERATŪRA

1. Adler P. R., Sanderson M. A., Boateng A. A., Weimer P. J., Hans-Joachim G. Jung. 2006. Biomass yield and biofuel quality of switchgrass harvested in fall or spring. *Agronomy Journal*, 98: 1518–1525.
2. Agbor V., Carere C., Cicek N., Sparling R., Levin D. 2014. Biomass pretreatment for consolidated bioprocessing (CBP). *In*: Advances in biorefineries. Woodhead Publishing, Sawston, 234–258.
3. Ahas R., Aasa A., Menzel A., Fedotova V. G., Scheifinger H. 2002. Changes in European spring phenology. *International Journal of Climatology* 22: 1727–1738.
4. Alexopoulou E., Sharma N., Paptheohari Y., Christou M., Piscioneri I., Panoutsou C., Pignatelli V. 2008. Biomass yields for upland and lowland switchgrass varieties grown in the Mediterranean region. *Biomass and Bioenergy*, 32: 926–933.
5. Aliscioni S. S., Giussani L. M., Zuloaga F. O., Kellogg E. A. 2003. A molecular phylogeny of *Panicum* (*Poaceae*: *Paniceae*): tests of monophyly and phylogenetic placement within the *Panicoideae*. *American Journal of Botany*, 90 (5): 796–821.
6. Allison G. G., Morris C., Lister S. J., Barraclough T., Yates N., Shield I., Donnison I. S. 2012. Effect of nitrogen fertiliser application on cell wall composition in switchgrass and reed canary grass. *Biomass and bioenergy*, 40: 19–26.
7. Amon T., Amon B., Kryvoruchko V., Machmüller A., Hopfner-Sixt K., Bodiroza V., Hrbek R., Friedel J., Pötsch E., Wagentristl H., Schreiner M., Zollitsch W. 2007. Methane production through anaerobic digestion of various energy crops grown in sustainable crop rotations. *Bioresource Technology*, 98: 3204–3212.
8. Anderson R. C. 2006. Evolution and origin of the central grassland of North America: climate, fire, and mammalian grazers. *Journal of the Torrey Botanical Society*, 133 (4): 626–647.
9. Angelini L. G., Ceccarini L., o Di Nasso N. N., Bonari E. 2009. Comparison of *Arundo donax* L. and *Miscanthus* × *giganteus* in a long-term field experiment in Central Italy: analysis of productive characteristics and energy balance. *Biomass and bioenergy*, 33 (4): 635–643.
10. Arundale R. A., Dohleman F. G., Heaton E. A., McGrath J. M., Voigt T. B., Long S. P. 2014. Yields of *Miscanthus* × *giganteus* and *Panicum virgatum* decline withstand age in Midwestern USA. *GCB Bioenergy*, 6: 1–13.
11. Ashworth A. J., Allen F. L., Bacon J. L., Sams C. E., Hart W. E., Grant J. F., ... & Pote D. H. 2017. Switchgrass Cultivar, Yield, and Nutrient Removal Responses to Harvest Timing. *Agronomy Journal*, 109 (6): 2598–2605.
12. Bagdonas A., Karalevičienė R. 1987. Agrometeorologo žinynas. Vilnius: Mokslas.
13. Barney J. N., Di Tomaso J. M. 2011. Global climate niche estimates for bioenergy crops and invasive species of agronomic origin: potential problems and opportunities. *PLoS ONE*, 6 (3): e17222. doi.org/10.1371/journal.pone.0017222
14. Basalykas A. (red.) 1958. Lietuvos TSR fizinė geografija. T. 1. Vilnius, pp. 504.
15. Baxter L. L., Miles T. R., Miles Jr T. R., Jenkins B. M., Milne T., Dayton D., Bryers R.W., Oden L. L. 1998. The behavior of inorganic material in biomass-fired power boilers: field and laboratory experiences. *Fuel Processing Technology*, 54: 47–78.

16. Bentsen N. S., Møller I. M. 2017. Solar energy conserved in biomass: Sustainable bioenergy use and reduction of land use change. Renewable and Sustainable Energy Reviews. doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.124
17. Berdahl J. D., Frank A. B., Krupinsky J. M., Carr P. M., Hanson J. D., Johnson H. A. 2005. Biomass yield, phenology, and survival of diverse switchgrass cultivars and experimental strains in western North Dakota. *Agronomy Journal*, 97 (2): 549–555.
18. Byrt C. S., Grof C. P. L., Furbank R. T. 2011. C4 Plants as biofuel feedstocks:optimising biomass production and feedstock quality from a lignocellulosic perspective. *Journal of Integrative Plant Biology*, 53 (2): 120–135.
19. Boe A., Casler M. D. 2005. Hierarchical analysis of switchgrass morphology. *Crop science*, 45 (6): 2465–2472.
20. Bondzinskas V. 2014. Biomasės naudojimo Lietuvos energetikoje ekonominė geografinė analizė: Bakalauro darbas. Vilnius: VU Geografijos ir kraštotvarkos katedra.
21. Bondzinskas V., Mačiulytė J. 2016. Biokuras Lietuvos energetikoje: energetinių želdinių ir miško produkcijos geografinė analizė. *Geografija ir edukacija*, 4: 33–46.
22. Börjesson P., Hansson J., Berndes G. 2017. Future demand for forest-based biomass for energy purposes in Sweden. *Forest Ecology and Management*, 383: 17–26.
23. Brazytė-Gorochovienė V., Kmitienė G., Vilkas A., Smaliukas D., Švedas K., Lazdauskaitė Ž. 2004. Pušinių šeimos augalų ūglių anatominiai tyrimai. Daktaro disertacija, Vilniaus pedagoginis universitetas.
24. Brutnell T. P, Wang L., Swartwood K., Goldschmidt A, Jackson D, Zhu X. G, Kellogg E, Van Eck J. 2010. *Setaria viridis*: a model for C4 photosynthesis. *The Plant Cell*, 22: 2537–2544.
25. Burns J. C., Godshalk E. B., Timothy D. H. 2008. Registration of 'BoMaster' Switchgrass. *Journal of Plant Registrations*, 2: 31–32.
26. Butkutė B., Lemežienė N., Cesevičienė J., Liatukas Ž, Dabkevičienė G. 2013a. Carbohydrate and lignin partitioning in switchgrass *Panicum virgatum* biomass as a bioenergy feedstock. *Zemdirbyste–Agriculture*, 100 (3): 251–260.
27. Butkutė B., Lemežienė N., Cesevičienė J., Liaudanskienė I. 2013b. Dry matter yield and carbon partitioning in the above-ground part of switchgrass (*Panicum virgatum* L.) germplasm. *Journal of International Scientific Publications: Agriculture and Food*, 1 (1): 87–97.
28. Butkutė B., Liaudanskienė I., Jankauskienė Z., Gruzdevienė E., Cesevičienė J., Amalevičiūtė K. 2015. Features of carbon stock in the biomass of industrial hemp and stinging nettle. *In*: Renewable Energy in the Service of Mankind Vol I (pp. 17–29). Springer International Publishing.
29. Butkutė B., Paplauskienė V. 2004. Changes in the quality of some Lithuanian grasses as affected by cutting time in spring. *Grassland Siences in Europe*, 9: 909–911.
30. Butkutė B., Šlepetienė A. 2013. Perdirbimui ir pašarams skirtų fitožaliavų kokybės tyrimų metodai, jų plėtojimas ir tobulinimas. Mokslinės metodikos inovatyviems žemės ir miškų mokslų tyrimams. Lututė: Kaunas, 434–447.
31. Casler M. D. (2005). Ecotypic variation among switchgrass populations from the northern USA. *Crop Science*, 45 (1): 388–398.

32. Casler M. D. 2012. Switchgrass Breeding, Genetics, and Genomics. *In:* A. Monti (ed.), Switchgrass: a valuable biomass crop for energy. London; New York: Springer: 29–53.
33. Casler M. D., Boe A. R. 2003. Cultivar × environment interactions in switchgrass. *Crop Science*, 43 (6): 2226–2233.
34. Casler M. D., Jung H. G., Coblentz W. K. 2008. Clonal selection for lignin and etherified ferulates in three perennial grasses. *Crop Science*, 48 (2): 424–433.
35. Casler M. D., Mitchell R. B., Vogel K. P. 2012. Switchgrass. Handbook of bioenergy crop plants, 2: 563–590.
36. Casler M. D., Ramstein G. P. 2017. Breeding for Biomass Yield in Switchgrass Using Surrogate Measures of Yield. *BioEnergy Research*: 1–12.
37. Casler M. D., Vogel K. P., Taliaferro C. M., Ehlke N. J., Berdahl J. D., Brummer E. C., Kallenbach R. L., West C. P., Michell R. B. 2007. Latitudinal and longitudinal adaptation of switchgrass populations. *Crop Science*, 47: 2249–2260.
38. Casler M. D., Vogel K. P., Taliaferro C. M., Wynia R. L. 2004. Latitudinal adaptation of switchgrass populations. *Crop Science*, 44 (1): 293–303.
39. Cassida K. A., Muir J. P., Hussey M. A., Read J. C., Venuto B. C., Ocumpaugh W. R. 2005. Biomass yield and stand characteristics of switchgrass in south central U.S. environments. *Crop Science*, 45: 673–681.
40. Chandra R. P., Bura R., Mabee W. E., Berlin A., Pan X., Saddler J. N. 2007. Substrate pretreatment: The key to effective enzymatic hydrolysis of lignocellulosics. p. 67–93. *In*: Biofuels. Springer-Verlag Berlin, Berlin.
41. Christian D. G., Riche A. B., Yates N. E. 2002. The yield and composition of switchgrass and coastal panic grass grown as a biofuel in Southern England. *Bioresource Technology*, 83: 115–124.
42. Christian D., Haase E., Clifton-Brown J., Cosentino S. 2001. Agronomy of *Miscanthus*. *In*: *Miscanthus* for Energy and Fibre (eds. Jones M.B., Walsh M.), pp. 21–45. James & James, London.
43. Chuck G. S., Tobias C., Sun L., Kraemer F., Li C., Dibble D., Arora R., Bragg J. N., Vogel J. P., Singh S., Simmons B .A., Pauly M., Hake S. 2011. Overexpression of the maize Corngrass1 microRNA prevents flowering, improves digestibility, and increases starch content of switchgrass. Proceedings of the National Academy of Sciences, 108: 17550–17555.
44. Cleland E. E., Chuine I., Menzel A., Mooney H. A., Schwartz M. D. 2007. Shifting plant phenology in response to global change. *Trends in Ecology and Evolution*, 22 (7): 357–365.
45. Conert H. J., 1998: Unterfamilie *Panicoideae*. – *In*: Hegi G. (Begr.), Conert H. J. (Hrsg.), Illustrierte Flora von Mitteleuropa, 1 (3): 22–70. Berlin–Hamburg.
46. Costich D. E., Friebe B., Sheehan M. J., Casler M. D., Buckler E. S. 2010. Genome-size variation in switchgrass (*Panicum virgatum*): flow cytometry and cytology reveal rampant aneuploidy. *The Plant Genome*, 3 (3): 130–141.
47. Crins W. 1991. The genera of *Paniceae* (*Gramineae*: *Panicoideae*) in the southeastern United States. *Journal of the Arnold Arboretum*, supplementary series 1: 171–312.
48. Dagys J. 1985. Augalų anatomija ir morfologija. Vilnius: Mokslas, p. 349.
49. Dahl J., Obernberger I. 2004. Evaluation of the combustion characteristics of four perennial energy crops (*Arundo donax*, *Cynara cardunculus*, *Miscanthus x gigan-*

teus and *Panicum virgatum*). Proceedings of the 2tnd EC on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection. Vol. I: 1265.

50. Dai W. M., Zhang K. Q., Duan B. W., Sun C. X., Zheng K. L., Cai R., Zhuang J. Y. 2005. Rapid Determination of Silicon Content in Rice. *Rice Science*, 12 (2): 145–147.
51. De La Torre Ugarte D. G., Walsh M. E., Shapouri H., Slinsky S. P. 2003. The economic impacts of bioenergy crop production on U.S. agriculture. US Department of Agriculture, Office of the Chief Economist, Office of Energy Policy and New Uses, Agricultural Economic Report No. 816.
52. Del Giudice A., Assirelli A., Gallucci F., Bellacima R., Pari L., Santangelo E. 2017. Production of energy feedstock from the riparian vegetation of *Arundo donax* (L.): Suitability of the chopping systems. *Ecological Engineering*, 102: 459–467.
53. Demirbaş A. 2003. Relationships between heating value and lignin, fixed carbon, and volatile material contents of shells from biomass products. *Energy Sources*, 25 (7): 629–635.
54. Dien B. S., Jung H. G., Vogel K. P., Casler M. D., Lamb J. F. S., Weimer P. J., Iten L., Mitchell R. B., Sarath G. 2006. Chemical composition and response to dilute-acid pretreatment and enzymatic saccharification of alfalfa, reed canarygrass, and switchgrass. *Biomass Bioenergy*, 30: 880–891.
55. Douglas J., Lemunyon J., Wynia R., Salon P. 2009. Planting and managing switchgrass as a biomass energy crop. *USDA-NRCS* (No. 3). Technical note. https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1042293.pdf
56. Duclos D. V., Ray D. T., Johnson D. J., Taylor A. G. 2013. Investigating seed dormancy in switchgrass (*Panicum virgatum* L.): understanding the physiology and mechanisms of coat-imposed seed dormancy. *Industrial Crops and Products*, 45: 377–387.
57. Dunn D. P., Stearns F., Guntenspergen G. R., Sharpe D. M. 1993. Ecological benefits of the Conservation Reserve Program.*Conservation Biology*, 7: 132–139.
58. Duvall M. R., Noll J. D., Minn A. H. 2001. Phylogenetics of *Paniceae* (*Poaceae*). *American Journal of Botany*, 88: 1988–1992.
59. Dzejanavičienė E. F., Pedišius N., Škėma R. 2011. Darni bioenergetika. Lietuvos energetikos institutas. Kaunas: p. 136.
60. Eisentraut A. 2010. Sustainable production of second-generation biofuels. https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/second_generation_biofuels.pdf
61. Elbersen B. S., Staritsky I. G., Hengeveld G. M., Schelhaas M. J., Naeff H. S. D., Böttcher H. 2012. Atlas of EU biomass potentials: spatially detailed and quantified overview of EU biomass potential taking into account the main criteria determining biomass availability from different sources (No. 3.3). Alterra/IIASA.
62. Elbersen H. W., Christian D. G., El Bassem N., Alexopoulou E., Pignatelli V., van den Berg D. 2001. Switchgrass (*Panicum virgatum* L.) as an alternative energy crop in Europe: initiation of a productivity network. Final report FAIR 5-CT97-3701:91.
63. Elbersen H. W., Poppens R. P., Bakker R. R. C. 2013. Switchgrass (*Panicum virgatum* L.): a perennial biomass grass for efficient production of feedstock for the biobased economy. NL Agency. http://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/282358

64. El-Nashaar H. M., Banowetz G. M., Griffith S. M., Casler M. D., Vogel K. P. 2009. Genotypic variability in mineral composition of switchgrass. *Bioresource Technology*, 100 (5): 1809–14.
65. European Commission (EC), Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: A Policy Framework for Climate and Energy in the Period from 2020 to 2030, COM, 2014, 15 final, {SWD(2014) 15 final}, {SWD(2014) 16 final}. http://ec.europa.eu/smart-regulation/impact/ia_carried_out/docs/ia_2014/swd_2014_0015_en.pdf
66. European Commission (EC), Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on the Promotion of the Use of Energy from Renewable Sources (Recast). Brussels, 2016, 30.11.2016 COM(2016) 767 final 2016/0382 (COD). http://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:151772eb-b7e9-11e6-9e3c-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_1&format=PDF
67. Fike J. H., Parrisha D.J., Wolfa D. D., Balaskob J. A., Green Jrc J. T., Rasnaked M., Reynoldse J. H. 2006. Long-term yield potential of switchgrass-for-biofuel systems. *Biomass and Bioenergy*, 30: 198–206.
68. Frank A. B., Berdahl J. D., Hanson J. D., Liebig M. A., Johnson H. A. 2004. Biomass and carbon partitioning in switchgrass. *Crop Science*, 44 (4): 1391–1396.
69. Fu C., Mielenz,J. R., Xiao X., Ge Y., Hamilton C. Y., Rodriguez M., ... & Dixon R. A. 2011. Genetic manipulation of lignin reduces recalcitrance and improves ethanol production from switchgrass. Proceedings of the National Academy of Sciences, 108 (9): 3803–3808.
70. Gaines T. P., Parker M. B., Gascho G. J. 1984. Automated determination of chlorides in soil and plant tissue by sodium nitrate. *Agron. J.* 76: 371–4.
71. Galvonaitė A., Misiūnienė M., Valiukas D., Buitkuvienė M. S. 2007. Lietuvos klimatas. Lithuanian Hydrometeorological Service. Vilnius, 208 p.
72. Gansberger M., Montgomery L. F., Liebhard P. 2015. Botanical characteristics, crop management and potential of *Silphium perfoliatum* L. as a renewable resource for biogas production: A review. *Industrial Crops and Products*, 63: 362–372.
73. Gečaitė I., Rimkus E. 2010. Sniego dangos režimas Lietuvoje. Geografija, 46 (1-2): 17–24.
74. Ghannoum O., von Caemmerer S., Conroy J. P. 2001. Carbon and water economy of Australian NAD-ME and NADP-ME C4 grasses. *Functional Plant Biology*, 28 (3): 213–223.
75. Giussani L. M., Cota-sa´ Nchez J. H., Zuloaga F. O., Kellogg E. A. 2001. A molecular phylogeny of the grass subfamily *Panicoideae* (*Poaceae*) shows multiple origins of C4 photosynthesis. *American Journal of Botany*, 88: 1993–2012.
76. Gupta R. B., Demirbas A. 2010. Gasoline, diesel, and ethanol biofuels from grasses and plants. Cambridge University Press. http://www.langtoninfo.com/web_content/9780521763998_frontmatter.pdf
77. Guretzky J. A., Biermacher J. T., Cook B. J., Kering M. K., Mosali J. 2011. Switchgrass for forage and bioenergy: harvest and nitrogen rate effects on biomass yields and nutrient composition. *Plant Soil*, 339: 69–81.
78. Hanson J. D., Johnson H. A. 2005. Germination of switchgrass under various temperature and pH regimes. *Seed Technology*, 27: 203–210.
79. Hartley W. 1961. Studies on the origin, evolution and distribution of the Gramineae. IV. The genus *Poa* L. *Australian Journal of Botany*, 9 (2): 152–161.

80. Hatfield R. D., Jung H. J. G., Ralph J., Buxton D. R., Weimer P. J. 1994. A comparison of the insoluble residues produced by the Klason lignin and acid detergent lignin procedures. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 65 (1): 51–58.
81. Hochman G., Sexton S. E., Zilberman D. 2008. The economics of biofuel policy and biotechnology. *Journal of Agricultural & Food Industrial Organization*, 6 (2), 8.
82. Hsu F. H., Nelson C. J., Matches A. G. 1985. Temperature effects on seedling development of perennial warm-season forage grasses. *Crop Science*, 25: 249–255.
83. Hulten E. 1962. The cirkumpolar plants 1. Vascular Cryptogams, Conifers, Monocotyledons. K. Svensk. Vet. Akad. Handl. Ser. 4, 8, Stockolm.
84. Hunt H. V., Badakshi F., Romanova O., Howe C. J., Jones M. K., Heslop-Harrison J. P. 2014. Reticulate evolution in *Panicum* (*Poaceae*): the origin of tetraploid broomcorn millet, *P. miliaceum*. *Journal of experimental botany*, 65 (12): 3165–3175.
85. Ibrahim K. M., Peterson P. M. 2014. Grasses of Washington, DC. Smithsonian Institution Scholarly Press, 99, p. 128.
86. Iqbal Y., Gauder M., Claupein W., Graeff-Hönninger S., Lewandowski I. 2015. Yield and quality development comparison between miscanthus and switchgrass over a period of 10 years. *Energy*, 89: 268–276.
87. Yan J., Chen W., Luo F. A. N., Ma H., Meng A., Li X., ... & Han B. I. N. 2012. Variability and adaptability of Miscanthus species evaluated for energy crop domestication. *Gcb Bioenergy*, 4 (1): 49–60.
88. Youngstrom S. E. 2013. A Localized Morphometric Study of Panicum Virgatum and Sister Taxa (Poaceae: Panicoideae: Paniceae). Doctoral dissertation, University of Missouri--St. Louis.
89. Jakienė E., Liakas V., Klimas E., Bačkaitis J. 2013. Energetinių žolinių ir sumedėjusių augalų auginimo technologijos. Akademija: 199.
90. Jankauskienė Z., Gruzdevienė E. 2016. Biomass Potential of Fibre Nettle in Lithuania. *In*: Perennial Biomass Crops for a Resource-Constrained World (pp. 87–93). Springer International Publishing.
91. Jasinskas A., Liubarskis V. 2003. Energetiniai augalai ir jų naudojimo technologijos. Kaunas: *Technologija*: 96 p.
92. Jasinskas A., Simonavičiūtė R., Šiaudinis G., Liaudanskienė I., Antanaitis Š., Arak M., Olt J. 2014. The assessment of common mugwort (*Artemisia vulgaris* L.) and cup plant (*Silphium perfoliatum* L.) productivity and technological preparation for solid biofuel. *Zemdirbyste--Agriculture*, 101 (1): 19–26.
93. Jefferson P. R., McCaughey W. P. 2012. Switchgrass (*Panicum virgatum* L.) cultivar adaptation biomass production, and cellulose concentration as affected by latitude origin. A*gronomy*, 2012: 1–9.
94. Jenkins B. M., Baxter L. L., Miles T. R. Jr, Miles T. R. 1998. Combustion properties of biomass. *Fuel Process Technology*, 54 (1): 17–46.
95. Johnson J. M., Gresham G. L. 2014. Do yield and quality of big bluestem and switchgrass feedstock decline over winter? *Bioenergy research*, 7 (1): 68–77.
96. Kadžiulienė Ž., Jasinskas A., Zinkevičius R., Makarevičienė V., Šarūnaitė L., Tilvikienė V., Šlepetys J. 2014. Miscanthus biomass quality composition and methods of feedstock preparation for conversion into synthetic diesel fuel. *Zemdirbyste–Agriculture*, 101 (1): 27–34.

97. Kadžiulienė Ž., Tilvikienė V., Šlepetys J., Dabkevičius Z. 2013. Biomass of grasses and other herbaceous plants for bioenergy use. *In*: Revitalising Grasslands to Sustain our Communities: Proceedings, 22nd International Grassland Congress, Sydney, Australia, pp. 1782–1785.
98. Kanapeckas J., Lemežienė N., Butkutė B., Stukonis V. 2011. Evaluation of tall fescue (*Festuca arundinacea* Schreb.) varieties and wild ecotypes as feedstock for biogas production. *Zemdirbyste–Agriculture*, 98 (2): 149–156.
99. Kerckhoffs H., Renquist R. 2013. Biofuel from plant biomass. *Agronomy for sustainable development*, 33 (1): 1–19.
100. Keshwani D. R., Cheng J. J. 2009. Switchgrass for bioethanol and other value-added applications: a review. *Bioresource Technology*, 100 (4): 1515–1523.
101. Kim S., Kiniry J. R., Williams A. S., Meki N., Gaston L., Brakie M., ... & Wu Y. 2017. Adaptation of C4 Bioenergy Crop Species to Various Environments within the Southern Great Plains of USA. *Sustainability*, 9 (1): 89.
102. Kindscher K., Kilroy H., Delise J., Long Q., Loring H., Dobbs K., Drake J. 2010. Vegetation Mapping and Classification of Tallgrass Prairie National Preserve. http://www1.usgs.gov/vip/tapr/taprrpt.pdf
103. Klimiuk E., Pokój T., Budzyński W., Dubis B. 2010. Theoretical and observed biogas production from plant biomass of different fibre contents. *Bioresource Technology*, 101 (24): 9527–35.
104. Kludze H., Deen B., Dutta A. 2011. Report on literature review of agronomic practices for energy crop production under Ontario conditions. University of Guelph. http://www.ofa.on.ca/uploads/userfiles/files/u%20of%20g%20ofa%20project-final%20report%20july%2004-2011%20(1).pdf
105. Knapp A. K. 1984. Water relations and growth of three grasses during wet and drought years in a tallgrass prairie. *Oecologia*. 65: 35–43.
106. Knight C. A., Molinari N. A., Petrov D. A. 2005. The large genome constraint hypothesis: evolution, ecology and phenotype. *Annals of Botany*, 95 (1): 177–190.
107. Kordas L., Tasz W. 2012. Plonowanie oraz zawartość makroelementòw w wybranych roślinach energetycznych uprawianych na zmodyfikowanych dodatkiem materialòw mineralnych i organicznych odpadach z flotacji rud miedzi. Fragmenta Agronomica 29 (3): 103–113.
108. Kraska J. E., Breitenbeck G. A. 2010. Simple, Robust Method for Quantifying Silicon in Plant Tissue. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 41: 2075–2085.
109. Kryževičienė A. 2006. Herbaceous plants as a renewable source of bioenergy. *Ekologija*, 2: 66–71.
110. Kryževičienė A., Jasinskas A., Žaltauskas A. 2001. Search for renewable energy sources in agriculture. *Zemdirbyste–Agriculture*, (74): 201–214.
111. Kryževičienė A., Kadžiulienė Ž., Šarūnaitė L., Dabkevičius Z., Tilvikienė V., Šlepetys J. 2011. Cultivation of *Miscanthus* × *giganteus* for biofuel and its tolerance of Lithuania's climate. *Zemdirbyste–Agriculture*, 98 (3): 267–274.
112. Kryževičienė A., Stukonis V., Dabkevičius Z., Kadžiulienė Ž. 2010. Assessment of perennial mugwort (*Artemisia vulgaris* L. and *Artemisia dubia* Wall.) potential for biofuel production. *Žemės ūkio mokslai*, 17 (1/2): 32–40.

113. Kumar A., Sokhansanj S. 2007. Switchgrass (*Panicum vigratum* L.) delivery to a biorefinery using integrated biomass supply analysis and logistics (IBSAL) model. *Bioresource technology*, 98 (5): 1033–1044.
114. Larson S. R., Pearson C. H., Jensen K. B., Jones T. A., Mott I. W., Robbins M. D., ... & Waldron B. L. 2017. Development and Testing of Cool-Season Grass Species, Varieties and Hybrids for Biomass Feedstock Production in Western North America. *Agronomy*, 7(1): 3.
115. Laurent A., Pelzer E., Loyce C., Makowski D. 2015. Ranking yields of energy crops: a meta-analysis using direct and indirect comparisons. *Renewable and sustainable energy reviews*, 46: 41–50.
116. Lee D., Owens V. N., Boe A., KOO B. C. 2009. Biomass and seed yields of big bluestem, switchgrass, and intermediate wheatgrass in response to manure and harvest timing at two topographic positions. Gcb Bioenergy, 1 (2): 171–179.
117. Lemežienė N., Kanapeckas J., Butkutė B. 2009. Biodujų gamybai tinkamiausios paprastosios šunažolės (*Dactylis glomerata* L.) veislės, selekcinės linijos ir ekotipai. *Zemdirbyste–Agriculture*, 96 (3): 36–46.
118. Lemežienė N., Kanapeckas J., Tarakanovas P., Nekrošas S. 1998. Daugiamečių varpinių žolių derlingumas bei kitos ūkiškai naudingos savybės. *Žemės ūkio mokslai*, 1: 42–47.
119. Lemus R., Brummer E. C., Moore K. J., Molstad N. E., Burras C. L., Barker M. F. 2002. Biomass yield and quality of 20 switchgrass populations in southern Iowa, USA. *Biomass Bioenergy*, 23 (6): 433–442.
120. Lewandowski I. 2013. Lignocellulosic Energy Crops lignocellulose/lignocellulosic energy crops, Production and Provision. *In*: Renewable Energy Systems, Springer New York, pp. 1181–1191.
121. Lewandowski I., Clifton-Brown J. C., Scurlock J. M. O., Huisman W. 2000. *Miscanthus*: European experience with a novel energy crop. *Biomass and Bioenergy*, 19 (4): 209–227.
122. Lewandowski I., Kicherer A. 1997. Combustion quality of biomass: Practical relevance and experiments to modify the biomass quality of *Miscanthus* x *giganteus*. *European Journal of Agronomy*, 6: 163–177.
123. Lewandowski I., Scurlock J. M. O., Lindvall E., Christou M. 2003. The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe. *Biomass and Bioenergy*, 25: 335–361.
124. Liebig M. A., Johnson H. A., Hanson J. D., Frank, A. B. 2005. Soil carbon under switchgrass stands and cultivated cropland. *Biomass and Bioenergy*. 28: 347–354.
125. Lindsey K., Johnson A., Kim P., Jackson S., Labbé N. 2013. Monitoring switchgrass composition to optimize harvesting periods for bioenergy and value-added products. *Biomass Bioenergy*, 56: 29–37.
126. Linkosalo T., Lechowicz M. J. 2006. Twilight far-red treatment advances leaf bud burst of silver birch (*Betula pendula*). *Tree Physiology*, 26: 1249–1256.
127. Liu L. 1998. Determination of chloride in plant tissue. *In*: Y. P. Kalra (ed.) Handbook of reference methods for plant analysis. CRC Press, Boca Raton, FL. pp. 111–113.
128. Lowry D. B., Behrman K. D., Grabowski P., Morris G. P., Kiniry J. R., Juenger T. E. 2014. Adaptations between ecotypes and along environmental gradients in *Panicum virgatum*. *The American Naturalist*, 183 (5): 682–692.

129. Madakadze I. C., Stewart K. A., Madakadze R. M., Smith D. L. 2003. Base temperatures for seedling growth and their correlation with chilling sensitivity for warm-season grasses. *Crop science*, 43 (3): 874–878.
130. Mani S., Tabil L. G., Sokhansanj S. 2004. Grinding performance and physical properties of wheat and barley straws, corn stover and switchgrass. *Biomass and Bioenergy*, 27 (4): 339–352.
131. Marčiukaitis M., Dzenajavičienė E. F., Kveselis V., Savickas J., Perednis E., Lisauskas A., ...& Erlickytė-Marčiukaitienė R. 2016. Atsinaujinančių energijos išteklių naudojimo Lietuvoje patirtis, reikšmė ir siekiai. *Energetika*, 62 (4): 247–267.
132. Massé D., Gilbert Y., Savoie P., Bélanger G., Parent G., Babineau D. 2010. Methane yield from switchgrass harvested at different stages of development in Eastern Canada. *Bioresource technology*, 101 (24): 9536–9541.
133. McKendry P. 2002. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology*, 83: 37–46.
134. McLaughlin S. B., Bouton J., Bransby D., Conge, B. V., Ocumpaugh W. R., Parrish D. J., Taliaferro C., Vogel K. P., Wullschleger S. D. 1999. Developing switchgrass as a bioenergy crop. *In*: Janick J. (Ed.), Perspectives on New Crops and New uses. ASHS Press, Alexandria, VA, pp. 282–299.
135. McLaughlin S. B., Samson R., Bransby D., Wiselogel A. 1996. Evaluating physical, chemical, and energetic properties of perennial grasses as biofuels. *In*: Proc. Bioenergy, 96, pp. 1–8.
136. McLaughlin S., Kszos A. L. 2005. Development of switchgrass as a bioenergy feedstock in the United States. *Biomass Bioenergy*, 28: 515–535.
137. McMillan C. 1959. The role of ecotypic variation in the distribution of the central grassland of North America. *Ecological Monographs*, 29 (4): 286–308.
138. Meier U. 1997. Growth stages of mono-and dicotyledonous plants. Blackwell Wissenschafts-Verlag. https://www.politicheagricole.it/flex/AppData/WebLive/Agrometeo/MIEPFY800/BBCHengl2001.pdf
139. Meredith M. R., Michaelson-Yeates T. P. T., Ougham H. J., Thomas H. 1995. *Trifolium ambiquum* as a source of variation in the breeding of white clover. *Euphytica*, 82: 185–191.
140. Metzger M. J., Shkaruba A. D., Jongman R. H. G., Bunce R. G. H. 2012. Descriptions of the European environmental zones and strata. Alterra Report 2281. Wageningen, 154 p.
141. Meusel H., Jäger E., Weinert E., 1965: Vergleichende Chorologie der zentraleuropäischen Flora. – Jena.
142. Miesel J. R., Renz M. J., Doll E., Jackson R. D. 2012. Effectiveness of weed management methods in estalishment of swichgrass and a native species mixture for biofuels in Wisconsin. *Biomass and Bioenergy*, 36: 121–131.
143. Miles T. R., Miles Jr T. R., Baxter L. L., Jenkins B. M., Oden L. L. 1993. Alkali slagging problems with biomass fuels (No. NREL/CP--200-5768-Vol. 1; CONF-9308106--Vol. 1). National Renewable Energy Lab., Golden, CO (United States).
144. Miller P., Lanier W., Brandt S. 2001. Using growing degree days to predict plant stages. Ag/Extension Communications Coordinator, Communications Services, Montana State University-Bozeman, Bozeman, MO.
145. Millet F. 2007. International union for the protection of new varieties of plants. http://www.upov.int/en/publications/tg-rom/tg248/tg_248_1.pdf

146. Miškinis V., Galinis A., Konstantinavičiūtė I. ir kt. 2011. Kietojo biokuro apskaitos energijos gamybos šaltiniuose taisyklės. Lietuvos energetikos instituto galutinė ataskaita, 70 p.
147. Mitchell R. B. Britton C. M. 2000. Managing weeds to establish and maintain warmseason grasses. p. 159–176. *In*: Moore K. J., Anderson B. E. (ed.) Native warmseason grasses. Research trends and issues. CSSA Special Publ. 30. CSSA and ASA, Madison, WI.
148. Mitchell R., Schmer M. 2012. Switchgrass harvest and storage. *In*: Switchgrass. Springer London, pp. 113–127.
149. Monti A. (Ed.). 2012. Switchgrass: A valuable biomass crop for energy. Springer Science & Business Media, pp. 209.
150. Monti A., Di Virgilio N., Venturi G. 2008. Mineral composition and ash content of six major energy crops. *Biomass Bioenerg*, 32: 216–223.
151. Monti A., Fazio S., Lychnaras V., Soldatos P., Venturi G. 2007. A full economic analysis of switchgrass under different scenarios in Italy estimated by BEE model. *Biomass and Bioenergy*, 31 (4): 177–185.
152. Monti A., Zanetti F., Scordia D., Testa G., Cosentino S. L. 2015. What to harvest when? Autumn, winter, annual and biennial harvesting of giant reed, miscanthus and switchgrass in northern and southern Mediterranean area. *Industrial Crops and Products*, 75: 129–134.
153. Moore K. J., Buxton D. R. 2000. Fiber composition and digestion of warm-season grasses. p. 23–33. *In*: Moore K. J., Anderson B. A. (ed.) Native Warm-Season Grasses: Research Trends and Issues. CSSA Special Publication, Crop Science Society of America,Madison, WI.
154. Moore K. J., Moser L. E. 1995. Quantifying developmental morphology of perennial grasses. *Crop Science*, 35 (1): 37–43.
155. Morrone O., Aagesen L., Scataglini M. A., Salariato D. L., Denham S. S., Chemisquy M. A., ... & Zuloaga F. O. 2012. Phylogeny of the *Paniceae* (*Poaceae*: *Panicoideae*): integrating plastid DNA sequences and morphology into a new classification. *Cladistics*, 28 (4): 333–356.
156. Moser L. E., Vogel K. P. 1995. Switchgrass, Big bluestem and Indiangrass: 409–420. *In*: Barnes R. F., Miller D. A., Nelson J. C. (Eds.) Forages Vol. I: An Introduction to Grassland Agriculture. 5th edn. Iowa State University Press, Ames.
157. Motiekaitytė V. 2002. Urbofitocenozės: sintaksonomija, toksikotolerantiškumas, sukcesijos, funkcijos. Vilnius: Botanikos instituto leidykla, p. 250.
158. Nagarajan V., Mohanty A. K., Misra M. 2013. New engineered biocomposites from poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) (PHBV)/poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) blends and switchgrass Fabrication and performance evaluation. *Industrial Crops Products*, 42: 461–468.
159. Narasimhamoorthy B., Saha M. C., Swaller T., Boruton J. H. 2008. Genetic diversity in switchgrass collections assessed by EST-SSR markers. *Bioenergy Research*, 1: 136–146.
160. Naujalis J. 1991. Augalų populiacinė biologija. Vilnius, p. 184.
161. Navys E. V. 2008. Sumedėjusių augalų ištvermingumo zonos Lietuvoje, žiemos pakenkimai ir jų vertinimas. Vilnius: Vilniaus universiteto leidykla, p. 102.
162. Nekrošius A., Navickas K., Venslauskas K., Kadžiulienė Ž., Tilvikienė V. 2014. Assessment of energy biomass potential and greenhouse gas emissions from biogas production from perennial grasses. *Zemdirbyste-Agriculture*, 101 (3): 271–278.

163. Nelson C. J., Volenec, J. J. 1995. Environmental and physiological aspects of forage management. *Forages*, 1: 55–69.
164. Nielsen J. B. H., Oleskowicz-Popiel P., Seadi T. A. 2007. Energy crop potentials for bioenergy in EU-27. 15th European Biomass Conference & Exhibition. Berlin: 94–103.
165. Nikitin, B. A. 1999. A method for soil humus determination. *Agricultural Chemistry*, 3: 156–158.
166. Obernberger I., Brunner T., Bärnthaler G. 2006. Chemical properties of solid biofuels - significance and impact. *Biomass Bioenergy*, 30 (11): 973–982.
167. Ogden C. A., Ileleji K. E., Johnson K. D., Wang Q. 2010. In-field direct combustion fuel property changes of switchgrass harvested from summer to fall. *Fuel Process Technology*, 91 (3): 266–271.
168. Ohri D. 2005. Climate and growth form: the consequences for genome size in plants. *Plant Biology*, 7 (05): 449–458.
169. O'Keefe K., Tomeo N., Nippert J. B., Springer C. J. 2013. Population origin and genome size do not impact *Panicum virgatum* (switchgrass) responses to variable precipitation. *Ecosphere*, 4 (3): 1–19.
170. Olson W. W. 1984. Phenology of selected varieties of warm season native grasses. *In*: Proceedings of the 9th North American prairie conference Vol. 29, pp. 639–643.
171. Osborne C. P., Freckleton R. P. 2009. Ecological selection pressures for C4 photosynthesis in the grasses. Proceedings of Royal Society B 276: 1753–1760.
172. Otto S. P., Whitton J. 2000. Polyploid incidence and evolution. *Annual review of genetics*, 34 (1): 401–437.
173. Parisod C., Holderegger R., Brochmann C. 2010. Evolutionary consequences of autopolyploidy. *New Phytologist*, 186 (1): 5–17.
174. Parrish D. J., Fike J. H. 2005. The biology and agronomy of switchgrass for biofuels. *BPTS*, 24 (5-6): 423–459.
175. Pedišius N., Praspaliauskas M., Valantinavičius M., Vonzodas T., Zaleskas V., Lemanas E., Čepauskienė D. 2016. Biokuro savybių ir juo kūrenamų mažos bei vidutinės galios įrenginių efektyvumo ir taršos parametrų tyrimai. *Energetika*, 62 (4): 268–281.
176. Pedroli B., Elbersen B., Frederiksen P., Grandin U., Heikkilä R., Krogh P.H., Izakovi č ová Z., Johansen A., Meiresonne L., Spijker J., 2013. Is energy cropping in Europe compatible with biodiversity? — opportunities and threats to biodiversity from land-based production of biomass for bioenergy purposes. *Biomass Bioenergy* 55: 73–86.
177. Persson G., Bärring L., Kjellström E., Strandberg G., Rummukainen M. 2007. Climate indices for vulnerability assessments. SMHI.
178. Pilger R. 1940. *Gramineae*. III: Unterfamilie *Panicoideae*. *In*: A. Engler and K. Prantl (eds.), Die natürlichen pflanzenfamilien, 2nd ed., 14: 1–208. Engelmann, Leipzig, Germany.
179. Piscioneri I., Pignatelli V., Palazzo S., Sharma N. 2001. Switchgrass production and establishment in the Southern Italy climatic conditions. *Energy conversion and management*, 42 (18): 2071–2082.
180. Pociene L., Kadziuliene Z. 2016. Biomass yield and fibre components in reed canary grass and tall fescue grown as feedstock for combustion. *Zemdirbyste-Agriculture*, 103 (3): 297–304.

181. Posen I. D., Jaramillo P., Landis A. E., Griffin W. M. 2017. Greenhouse gas mitigation for US plastics production: energy first, feedstocks later. *Environmental Research Letters*, 12 (3): 034024.
182. Pouli J. R., Reid R. L., Belesky D. P. 1992. Photosensitization in lambs grazing switchgrass. *Agronomy Journal*, 84: 1077–1080.
183. Pound R., Clements F. E. 1898. The vegetation regions of the prairie province. Botanical Gazette, 25 (6): 381–394.
184. Povilaitis V., Šlepetienė A., Šlepetys J., Lazauskas S., Tilvikienė V., Amalevičiūtė K., ... & Kadžiulienė Ž. 2016. The productivity and energy potential of alfalfa, fodder galega and maize plants under the conditions of the nemoral zone. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B—Soil & Plant Science*, 66 (3): 259–266.
185. Price D. L., Casler M. D. 2014 b. Divergent selection for secondary traits in upland tetraploid switchgrass and effects on sward biomass yield. *BioEnergy Research*, 7 (1): 329–337.
186. Price D. L., Casler, M. D. 2014 a. Predictive relationships between plant morphological traits and biomass yield in switchgrass. *Crop Science*, 54 (2): 637–645.
187. Proskurina S., Sikkema R., Heinimö J., Vakkilainen E. 2016. Five years left–How are the EU member states contributing to the 20% target for EU's renewable energy consumption; the role of woody biomass. *Biomass and Bioenergy*, 95: 64–77.
188. Pudas E., Leppälä M., Tolvanen A., Poikolainen J., Venäläinen A., Kubin E. 2008. Trends in phenology of Betula pubescens across the boreal zone in Finland. *International Journal of Biometeorology*, 52: 251–259.
189. Rapacz M., Ergon Å., Höglind M., Jørgensen M., Jurczyk B., Østrem L., ... & Tronsmo A. M. 2014. Overwintering of herbaceous plants in a changing climate. Still more questions than answers. *Plant Science*, 225: 34–44.
190. Reddy N., Yang Y. 2007. Natural cellulose fibers from switchgrass with tensile properties similar to cotton and linen. *Biotechnology and Bioengineering*, 97 (5): 1021–1027.
191. Risser P. G., Birney E. C., Blocker H. D., May S. W., Parton, W. J. 1981. The true prairie ecosystem US/IBP Synthesis Series 16. Stroudsburg.
192. Robbins M. P., Evans G., Valentine J., Donnison I. S., Alison G. G. 2012. New opportunities for the exploitation of energy crops by thermochemical conversion in Northern Europe and the UK. *Progress in Energy and Combustion Sciense*, 38: 138–155.
193. Robson P., Jensen E., Hawkins S., White S. R., Kenobi K., Clifton-Brown J., ... & Farrar K. 2013. Accelerating the domestication of a bioenergy crop: identifying and modelling morphological targets for sustainable yield increase in Miscanthus. *Journal of experimental botany*, 64 (14): 4143–4155.
194. Rodriguez C., Alaswad A., Benyounis K. Y., Olabi A. G. 2017. Pretreatment techniques used in biogas production from grass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68: 1193–1204.
195. Sage R. F. 2004. The evolution of C4 photosynthesis. *New phytologist*, 161 (2): 341–370.
196. Sage R. F., de Melo Peixoto M., Friesen P., Deen B. 2015. C4 bioenergy crops for cool climates, with special emphasis on perennial C4 grasses. *Journal of experimental botany*, 66 (14): 4195–4212.
197. Sakalauskas A. 2014. Žemės ūkio, maisto ūkio ir žuvininkystės MTTV projekto „Daugiamečių žolių ir netradicinių žolinių augalų (drambliažolės, sidos, legestų,

nendrinių žolių) bei jų mišinių panaudojimas presuoto biokuro gamybai“ galutinė ataskaita, 68 p.
198. Samson R. 2007. Switchgrass production in Ontario: a management guide. Resource Efficient Agricultural Production (REAP)-Canada.
199. Samson R., Sudhagar M., Boddey R., Sokhansanj S., Quesada D., Urquiaga S., Reis V., Lem C. H. 2005. The potential of C4 perennial grasses for developing a global BIOHEAT industry. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 24: 461–495.
200. Sanderson M. A., Adler P. R. 2008. Perennial forages as second generation bioenergy crops. *International Journal of Molecular Science*, 9: 768–788.
201. Sanderson M. A., Martin N. P., Adler P. 2007. Biomass, energy, and industrial uses of forages: 635–647. *In*: Barnes R. F. et al. (Eds.) Forages Vol. II: The Science of Grassland Agriculture. 6th edn. Blackwell, Ames.
202. Sanderson M. A., Moore K. J. 1999. Switchgrass morphological development predicted from day of the year or degree day models. *Agronomy journal*, 91 (4): 732–734.
203. Sanderson M. A., Read J. C., Reed R. L. 1999. Harvest management of switchgrass for biomass feedstock and forage production. *Agronomy Journal*, 91: 5–10.
204. Sanderson M. A., Reed R. L. 2000. Switchgrass growth and development: Water, nitrogen, and plant density effects. *Journal of Range Management*, 53: 221–227.
205. Sanderson M. A., Reed R. L., McLaughlin S. B., Wullschleger S. D., Conger B. V., Parrish D. J., Wolf D. D., Taliaferro C., Hopkins A. A., Ocumpaugh W. R., Hussey M. A., Read J. C., Tischler C. R. 1996. Switchgrass as a sustainable bioenergy crop. *Bioresource Technology*, 56: 83–93.
206. Sanderson M. A., Schmer M., Owens V., Keyser,P., Elbersen W. 2012. Crop management of switchgrass. In Switchgrass, pp. 87–112. Springer, London.
207. Sarath G., Baird L. M., Mitchell R. B. 2014. Senescence, dormancy and tillering in perennial C 4 grasses. *Plant science*, 217: 140–151.
208. Scally L., Hodkinson T., Jones M. B. 2001. Origins and taxonomy of *Miscanthus*. *Miscanthus* for energy and fibre. Jones M. B., Walsh M. (eds.). James and James Ltd, London, UK, pp. 1–9.
209. Schmer M. R., Mitchell R. B., Vogel K. P., Schacht W. H., Marx D. B. 2010. Efficient methods of estimating switchgrass biomass supplies. *BioEnergy research*, 3 (3): 243–250.
210. Schmer M. R., Vogel K. P., Mitchell R. B., Moser L. E., Eskridge K. M., Perrin R. K. 2006. Establishment stand thresholds for switchgrass grown as a bioenergy crop. *Crop Science*, 46:157–161.
211. Schmer M. R., Vogel K. P., Mitchell R. B., Perrin R. K. 2008. Net energy of cellulosic ethanol from switchgrass. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,105: 464–469.
212. Seppälä M., Paavola T., Lehtomäki A., Rintala J. 2009. Biogas production from boreal herbaceous grasses-specific methane yield and methane yield per hectare. *Bioresource Technology*, 100 (12): 2952–2958.
213. Shankar S. 2017. Renewable and Nonrenewable Energy Resources: Bioenergy and Biofuels. *In*: Principles and Applications of Environmental Biotechnology for a Sustainable Future, Springer Singapore, pp. 293–314.
214. Sheffield J., Wood E. F. 2008. Projected changes in drought occurrence under future global warming from multi-model, multi-scenario, IPCC AR4 simulations. *Climate dynamics*, 31 (1): 79–105.

215. Shen ZX, Parrish D. J., Wolf D. D., Welbaum G. E. 2001. Stratification in switchgrass seed is reversed and hastened by drying. *Crop Science*, 41: 1546–1551.
216. Shewmaker G. E., Mayland H. F., Roberts C. A., Harison P. A. 2006. Daily carbohydrate accumulation in eight tall fescue cultivars. *Grass and Forage Science*, 61: 413–421.
217. Simmons B. A. 2011. Bioenergy from plants and plant residues. *Plant Biotechnology and Agriculture: Prospects for the 21st Century*: 495–506.
218. Simonavičiūtė R. 2013. Netradicinių energetinių augalų ruošimo ir naudojimo biokurui technologinis–techninis įvertinimas. Daktaro disertacija, Aleksandro Stulginskio Universitetas.
219. Sims R. E. H., Mabee W., Saddler J., Taylor M. 2010. An overview of second generation biofuel technologies. *Bioresource Technology*, 101: 1570–1580.
220. Skuodienė R., Repšienė R., Karčauskienė D., Katutis K., Sendžikienė E. 2013. The effect of meadow phytocenoses productivity and herbage quality on the energy value of biomass. *Zemdirbyste-Agriculture*, 100 (4): 349–354.
221. Slepetiene A., Slepetys J., Tilvikiene V., Amaleviciute K., Liaudanskiene I., Ceseviciene J., ... & Buliauskaite R. 2016. Evaluation of chemical composition and biogas production from legumes and perennial grasses in anaerobic digestion using the oxitop system. *Fresenius Environmental Bulletin*, 25 (5): 1343–1348.
222. Slepetys J., Kadžiulienė Ž., Tilvikiene V. 2013. Evaluation of biomass yield and quality of energy crops in Lithuania. *In*: The role of grasslands in a green future: threats and perspectives in less favoured areas. Proceedings of the 17th Symposium of the European Grassland Federation, Akureyri, Iceland, pp. 545–547.
223. Sluiter J. B., Ruiz R. O., Scarlata C. J., Sluiter A. D., Templeton D. W. 2010. Compositional analysis of lignocellulosic feedstocks. 1. Review and description of methods. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58: 9043–9053.
224. Smeets E. M. W., Lewandowski I. M., Faaij A. P. C. 2009. The economical and environmental performance of miscanthus and switchgrass production and supply chains in a European setting. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13: 1230–1245.
225. Somerville C., Youngs H., Taylor C., Davis S. C., Long S. P. 2010. Feedstock for lignocellulosic biofuels. *Science*, 329: 790–792.
226. Soreng R. J., Peterson P. M., Romaschenko K., Davidse G., Zuloaga F. O., Judziewicz E. J., ... & Morrone O. 2015. A worldwide phylogenetic classification of the *Poaceae* (*Gramineae*). *Journal of Systematics and Evolution*, 53 (2): 117–137.
227. Sripathi R., Kakani V. G., Wu Y. 2013. Genotypic variation and trait relationships for morphological and physiological traits among new switchgrass populations. *Euphytica*, 191 (3): 437–453.
228. Stebbins G. L. 1985. Polyploidy, hybridization, and the invasion of new habitats. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 72: 824–832.
229. Stegelmeier B. L., Elmore S. A., Lee S. T., James L. F., Gardner D. R., Panter K. E., ... & Wierenga T. L. 2007. Switchgrass (*Panicum virgatum*) Toxicity in Rodents, Sheep, Goats and Horses. *In*: Poisonous Plants: Global Research and Solutions, Panter K.(Ed.). CABI Publishing, New York, USA, 113–117.
230. Stolarski M. J., Krzyżaniak M., Śnieg M., Słomińska E., Piórkowski M., Filipkowski R. 2014. Thermophysical and chemical properties of perennial energy crops depending on harvest period. *International Agrophysics*, 28 (2): 201–211.

231. Szemmelveisz K., Szűcs I., Palotas A.B., Winkler L., Eddings E.G. 2009. Examination of the combustion conditions of herbaceous biomass. *Fuel Process Technology*, 90 (6): 839–847.
232. Šateikis I. S. 2006. Augalinės biomasės auginimo ir naudojimo kietajam kurui energetinis potencialas ir mokslinės problemos. Žemės ūkio inžinerija, 38 (3): 5–21.
233. Šiaudinis G., Jasinskas A., Šarauskis E., Steponavičius D., Karčauskienė D., Liaudanskienė I. 2015. The assessment of Virginia mallow (*Sida hermaphrodita* Rusby) and cup plant (*Silphium perfoliatum* L.) productivity, physico–mechanical properties and energy expenses. *Energy*, 93: 606–612.
234. Šiaudinis G., Jasinskas A., Šlepetienė A., Karčauskienė D. 2012. The evaluation of biomass and energy productivity of common mugwort (*Artemisia vulgaris* L.) and cup plant (*Silphium perfoliatum* L.) in Albeluvisol. *Zemdirbyste–Agriculture*, 99 (4): 357–362.
235. Štyps E., Mickevičius T. M., Stulpinienė V. 2016. Biodegalų gamybos pokyčiai ES–ekonominis požiūris. Mokslo taikomieji tyrimai Lietuvos kolegijose, 1 (11): 237–244
236. Taherzadeh M. J., Karimi K. 2008. Pretreatment of lignocellulosic wastes to improve ethanol and biogas production: a review. *International journal of molecular sciences*, 9 (9): 1621–1651.
237. Tahir M. H. N., Casler M. D., Moore K. J., Brummer E. C. 2011. Biomass yield and quality of reed canarygrass under five harvest management systems for bioenergy production. BioEnergy Research, 4 (2): 111–119.
238. Taliaferro C. M. 2003. Breeding and selection of new switchgrass varieties for increased biomass production (No. ORNL/SUB-02-19XSY162C/01). ORNL Oak Ridge National Laboratory (US). http://info.ornl.gov/sites/publications/Files/Pub57756.pdf
239. Tenenbaum D. J. 2008. Food vs. fuel: diversion of crops could cause more hunger. *Environmental Health Perspectives*, 116: A254–A257.
240. Theander O., Westerlund E. A. 1986. Studies on dietary fiber. 3. Improved procedures for analysis of dietary fiber. *J. Agric. Food Chem* 34: 330.
241. Tilvikiene V., Kadziuliene Z., Dabkevicius Z. 2009. Biomass of cocksfoot and tall fescue as a substrate for biogas production. *Grassland Science in Europe*, 14: 322–324.
242. Tilvikiene V., Kadziuliene Z., Dabkevicius Z., Venslauskas K., Navickas K. 2016. Feasibility of tall fescue, cocksfoot and reed canary grass for anaerobic digestion: Analysis of productivity and energy potential. *Industrial Crops and Products*, 84: 87–96.
243. Tilvikiene V., Kadziuliene Z., Slepetys J. 2012 a. The productivity of Miscanthus under Lithuania's climate conditions: a two-year study. *Grassland science in Europe*, 18.
244. Tilvikienė V., Venslauskas K., Navickas K., Župerka V., Dabkevičius Z., Kadžiulienė Ž. 2012 b. The biomass and biogas productivity of perennial grasses. *Zemdirbyste-Agriculture*, 99 (1): 17–22.
245. Tischler C. R. Voigt P. W. 1993. Characterization of crown node elevation in panicoid grasses. *Journal of Range Management*, 46: 436–439.

246. Titova J., Bakšienė E. 2015. Nuotekų dumblo komposto įtaka energetinių augalų–pavėsinio kiečio (*Artemisia dubia* Wall.) ir sidos (*Sida hermaphrodita* (L.) Rusby)–augimui. *Žemės ūkio mokslai*, 22(3): 155–162
247. Tyler B. F., Hayes J. D., Davies W. E. 1987. Collection, characterization and utilization of genetic resources of temperate forage grass and clover. International board for plant genetic resources. IBPGR, Rome, 1–65.
248. Tornqvist C. E., Vaillancourt B., Kim J., Buell C. R., Kaeppler S. M., Casler M. D. 2017. Transcriptional Analysis of Flowering Time in Switchgrass. *BioEnergy Research*, 10 (3): 700–713.
249. Trinklein D. H. 2006. Ornamental grasses. Flowers and houseplants. https://mospace.umsystem.edu/xmlui/bitstream/handle/10355/51074/g6661-2006.pdf?sequence=1
250. Triplett J. K, Wang Y., Zhong J., Kellogg E. A. 2012. Five nuclear loci resolve the polyploid history of switchgrass (*Panicum virgatum* L.) and relatives. *PLoS One*, 7: e38702.
251. Trócsányi Z. K., Fieldsend A. F., Wolf D. D. 2009. Yield and canopy characteristics of switchgrass (*Panicum virgatum* L.) as influenced by cutting management. *Biomass and Bioenergy*, 33 (3): 442–448.
252. Uchytil R. J. 1993. *Panicum virgatum*. Fire Effects Information System, (Online). US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fire Sciences Laboratory (Producer). https://www.fs.fed.us/database/feis/plants/graminoid/panvir/all.html
253. Vainorienė R. 2016. Modelinio augalo žaliosios šerytės (Setaria viridis (L.) P. Beauv.) savybės, paplitimas agrocenozėse ir urbanizuotoje aplinkoje. Miestų želdynų formavimas 1 (13): 381–388.
254. Van Der Weijde T., Dolstra O., Visser R. G., Trindade L. M. 2017. Stability of cell wall composition and saccharification efficiency in Miscanthus across diverse environments. *Frontiers in plant science*, 7: 2004. doi.org/10.3389/fpls.2016.02004
255. Van Esbroeck G. A., Hussey M. A., Sanderson M. A. 2003. Variation between Alamo and Cave-in-Rock switchgrass in response to photoperiod extension. *Crop Science*, 43 (2): 639–643.
256. Varvel G. E., Vogel K. P., Mitchell R. B., Follett R. F., Kimble J. M. 2008. Comparison of corn and switchgrass on marginal soils for bioenergy. *Biomass and bioenergy*, 32 (1): 18–21.
257. Vassilev S., Vassileva C., Baxter D., Andersen L. 2010. Relationships between chemical and mineral composition of coal and their potential applications as genetic indicators. Part 2. Mineral classes, groups and species. *Geologica Balcanica*, 39 (3): 43–67.
258. Venendaal R., Jørgensen U., Foster C. A. 1997. European energy crops: a synthesis. *Biomass and Bioenergy*, 13 (3): 147–185.
259. Venturi P., Venturi G. 2003. Anglysis of energy comparison for crops in European agricultural systems. *Biomass and Bioenergy*, 25: 235–255.
260. Vermerris W. 2008. Composition and biosynthesis of lignocellulosic biomass. *In*: Vermerris, W. (ed.). Genetic improvement of bioenergy crops. Springer Science and Business Media, New York, NY, pp.89–142.
261. Ververis C., Georghiou K., Christodoulakis N., Santas P., Santas R. 2004. Fiber dimensions, lignin and cellulose content of various plant materials and their suitability for paper production. *Industrial Crops Products*, 19: 245–254.

262. Vogel K. P. 2004. Switchgrass. *In*: Moser L. E., Burson B. L., Sollenberger L. E. (eds.) Warmseason (C4) grasses. ASA-CSSA-SSSA, Madison
263. Vogel K. P., Jung H. G. 2000. Genetic improvement of switchgrass and other herbaceous plant for use as biomass fuel feedstock. Final report by USDA- Agriculture Research Service. http://www.ornl.gov/~webworks/cpr/rpt/108995_.pdf
264. Vogel K. P., Mitchell R. B. 2008. Heterosis in switchgrass: biomass yield in swards. *Crop Science*, 48 (6): 2159–2164.
265. Vogel K. P., Mitchell R. B., Casler M. D., Sarath G. 2014. Registration of 'Liberty'switchgrass. *Journal of Plant Registrations*, 8 (3): 242–247.
266. Walsh M., Jones M. 2013. Miscanthus: for energy and fibre. Routledge. https://books.google.lt/books?id=bXP7AQAAQBAJ&pg=PA1&lpg=PA1&dq=Miscanthus+genus+origin&source=bl&ots=GkeZ-WN8wa&sig=BlaMePCO_xIvMS0nPUJ2w6QnSLs&hl=lt&sa=X&ved=0ahUKEwiDrvqR-ze_SAhWCjCwKHZ3pC04Q6AEIMjAD#v=onepage&q=Miscanthus%20genus%20origin&f=false
267. Wang W. 2016. Energy Crops vs. Forest Biomass for Meeting the Renewable Fuel Standard: Implications for Land Use and GHG Emissions. http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2776426
268. Warner D. A., Ku M .S., Edwards G. E. 1987. Photosynthesis, leaf anatomy, and cellular constituents in the polyploid C4 grass *Panicum virgatum*. *Plant Physiology*, 84, (2): 461–466.
269. Werling B. P., Dickson T. L., Isaacs R., Gaines H., Gratton C., Gross K. L., ... & Robertson B. A. 2014. Perennial grasslands enhance biodiversity and multiple ecosystem services in bioenergy landscapes. Proceedings of the National Academy of Sciences, 111 (4): 1652–1657.
270. Wilson D. M., Dalluge D. L., Rover M., Heaton E. A., Brown R. C. 2013. Crop management impacts biofuel quality: influence of switchgrass harvest time on yield, nitrogen and ash of fast pyrolysis products. *Bioenergy Research*, 6 (1): 103–113.
271. Wilson G. W., Hartnett D. C. 1998. Interspecific variation in plant responses to mycorrhizal colonization in tallgrass prairie. *American Journal of Botany*, 85 (12): 1732–1738.
272. Woiciechowski A. L., Medeiros A. B. P., Rodrigues C., de Souza Vandenberghe L. P., de Andrade Tanobe V. O., Dall'Agnol A., ... & Soccol C. R. 2016. Feedstocks for Biofuels. *In*: Green Fuels Technology, Springer International Publishing, pp. 15–39.
273. Wolf D. Fiske D. 2009. Planting and Managing Switchgrass for Forage, Wildlife, and Conservation. Virginia Cooperative Extension. Publication 418-013.
274. Wright L. L. 2007. Historical perspective on how and why switchgrass was selected as a" model" high-potential energy crop (No. ORNL/TM-2007/109). Oak Ridge National Laboratory (ORNL). http://info.ornl.gov/sites/publications/files/Pub7047.pdf
275. Wullschleger S. D., Davis E. B., Borsuk M. E., Gunderson C. A., Lynd L. R. 2010. Biomass production in switchgrass across the United States: Database description and determinants of yield. *Agronomy Journal*, 102: 1158–1168.

276. Xu B. C., Li F. M., Shan L. 2008. Switchgrass and milkvetch intercropping under 2:1 row-replacement in semiarid region, northwest China:Aboveground biomass and water use efficiency. *European Journal of Agronomy*, 28: 485–492.
277. Xu B., Escamilla-Treviño L. L., Sathitsuksanoh N., Shen Z., Shen H., Percival Zhang Y. H., Zhao B. 2011. Silencing of 4-coumarate: coenzyme A ligase in switchgrass leads to reduced lignin content and improved fermentable sugar yields for biofuel production. *New phytologist*, 192 (3): 611–625.
278. Zarnstorff M. E., Keys R. D., Chamblee D. S. 1994. Growth regulator and seed storage effects on switchgrass germination. *Agronomy Journal*, 86 (4): 667–672.
279. Zegada-Lizarazu W., Wullschleger S. D., Nair S. S., Monti A. 2012. Crop physiology. *In*: Switchgrass, Springer London, pp. 55–86.
280. Zeng-Hui L., Hong-Bo S. 2010. Comments: Main developments and trends of international energy plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14: 530–534.
281. Zhao D., MacKown C. T., Starks P. J., Kindiger B. K. 2010. Rapid analysis of nonstructural carbohydrate components in grass forage using microplate enzymatic assays. *Crop Science*, 50 (4): 1537–1545.
282. Zhu X. G., Long S. P., Ort D. R. 2010. Improving photosynthetic efficiency for greater yield. *Annual review of plant biology*, 61: 235–261.
283. Zuloaga F. O. 1987. Systematics of New World Species of *Panicum* (*Poaceae*: *Paniceae*). *In*: Soderstrom T. R., Hilu K. W., Campbell C. S., Barkworth M. E. (Eds.), Grass systematics and evolution, 287–306. Smithsonian Institution Press, Washington, D.C., USA.
284. Zuloaga F. O., Morrone O., Davidse G., Filgueiras T. S., Peterson P. M., Soreng R. J., Judziewicz E. J. 2003. Catalogue of New World grasses (Poaceae): III. subfamilies Panicoideae, Aristidoideae, Arundinoideae, and Danthonioideae. Contributions from the United States National Herbarium 46: 1–662.
285. Zuloaga F. O., Morrone O., Vega A. S., Giussani L. M. 1998. Revision y Analysis Cladistico de Steinchisma (*Poaceae*: *Panicoideae*: *Paniceae*). *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 85: 631–656.
286. Кулик М. І. 2013. Вплив умов вирощування на врожайність фітомаси світчграсу (*Panicum virgatum* L.) другого року веґетації. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*, (2): 30–35.

DISERTACIJOS TEMA PASKELBTŲ PUBLIKACIJŲ SĄRAŠAS

Straipsniai leidiniuose, referuojamuose ir turinčiuose citavimo indeksą duomenų bazėje „Clarivate Analytics Web of Science“

4. **E. Norkevičienė**, N. Lemežienė, J. Cesevičienė, B. Butkutė. 2016. Switchgrass from North Dakota – a new bioenergy crop in the nemoral zone of Europe. Communications in Soil Science and Plant Analysis Vol. 47 No. Sup. 1: 64–74.
5. Dabkevičienė G., Lemežienė N., **Norkevičienė E**., Liatukas Ž., Cesevičienė J., Armonienė R., Butkutė B. 2015. Variability of nuclear DNA content and agromorphological characteristics of switchgrass (*Panicum virgatum* L.) germplasm in Lithuania. Zemdirbystė–Agriculture, 102 (2): 153–158.
6. Lemežienė N., **Norkevičienė E**., Liatukas Ž., Dabkevičienė G., Cesevičienė J., Butkutė B. 2015. Switchgrass from North Dakota – an adaptable and promising energy crop for northern regions of Europe. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B: Soil and Plant Science, 65 (2): 118–124.

Straipsniai recenzuojamuose periodiniuose leidiniuose

3. **E. Norkevičienė**, V. Kemešytė, G. Dabkevičienė, B. Butkutė. 2016. Yield of Lithuania-grown switchgrass populations differing in ploidy level. Agriculture & Food, Volume 4: 74–84.
4. Butkutė B., Cesevičienė J., **Norkevičienė E**. 2014. Development of low-cost and rapid method for the evaluation of organic and inorganic components in switchgrass biomass. The 11th international conference of young scientists on energy issues CYSENI. Kaunas, p. 69–78.

Tarptautiniu mastu pripažintų mokslo leidyklų išleistos monografijos, knygos, vadovėliai, jų dalys

2. Butkutė B., Cesevičienė J., Lemežienė N., **Norkevičienė E.**, Dabkevičienė G., Liatukas Ž. 2014. The variation of ash and inorganic elements concentrations in the biomass of Lithuania-grown switchgrass (*Panicum virgatum* L.). In: A. Sayigh (ed.) Renewable Energy in the Service of Mankind, Vol I, Chapter 8. Springer International Publishing Switzerland, p. 75–90.

Santraukos Lietuvoje ir užsienyje rengtų mokslinių konferencijų leidiniuose

7. **Norkevičienė E**., Butkutė B. 2018. Rykštinės soros (*Panicum virgatum* L.) agrobiologinis potencialas Europos vėsiojo vidutinio klimato sąlygomis. // Agrariniai ir miškininkystės mokslai: naujausi tyrimų rezultati ir inovatyvūs sprendimai. Mokslinės konferencijos pranešimai Nr. 8, p. 47–49.
8. **Norkevičienė**, **E**. 2017. Phenology, overwintering and yield performance of switchgrass cultivars grown in Lithuania. // 4th International Vavilov Conference „N. I. Vavilov`s Ideas in the Modern World“, Saint-Petersburg, Russia, p. 341.
9. Lemežienė N., Stukonis V., Kemešytė V., Liatukienė A., **Norkevičienė E.** 2017. Daugiamečių žolių kolekcijų plėtra ir genetinių išteklių polimorfiškumo tyrimai.

Įvairios paskirties Lietuvoje mažai kultivuojamų rūšių selekcija. // Agrariniai ir miškininkystės mokslai: naujausi tyrimų rezultati ir inovatyvūs sprendimai. Mokslinės konferencijos pranešimai Nr. 7, p. 93–94.
10. **Norkevičienė E.** 2015. Rykštėtosios soros (*Panicum virgatum* L.), kaip kietojo biokuro šaltinio, įvertinimas pagal mineralinę biomasės sudėtį. // IV Jaunųjų mokslininkų konferencijos „Jaunieji mokslininkai žemės ūkio pažangai" pranešimų tezių rinkinys, p. 30.
11. **Norkevičienė E.**, Butkutė B., Lemežienė N., Cesevičienė J., Kemešytė V. 2015. The potential of swichgrass for bioenergy production in comparison to reed canary grass under cool temperate climate conditions. // European Biomass Conference and Exhibition Proceedings, 23rd EUBCE, Viena, p. 127–134.
12. **Norkevičienė E**. 2014. Rykštėtosios soros (*Panicum virgatum* L.), kaip bioenerginio C4 augalo, genetinės kolekcijos tyrimai Lietuvoje. // III Jaunųjų mokslininkų konferencijos „Jaunieji mokslininkai žemės ūkio pažangai" pranešimų tezių rinkinys, p. 40.

Mokslo populiarinimo straipsniai

3. **Norkevičienė E**., Lemežienė N., Butkutė B. 2015. Rykštėtosios soros – biokuro gamybai. Mano ūkis, gegužė, p. 32–36.
4. **Norkevičienė E**. 2014. Augalai ateities pasauliui. Ūkininko patarėjas, Nr. 130 (3238), p. 8–9.

PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA RANKRAŠČIAI

This is an Accepted Manuscript of an article published by Taylor & Francis in Communications in soil science and plant analysis on 14 Nov 2016, available online: http://www.tandfonline.com/ https://doi.org/10.1080/00103624.2016.1232098

COMMUNICATIONS IN SOIL SCIENCE AND PLANT ANALYSIS
2016, VOL. 47, NO. S1, 64–74
http://dx.doi.org/10.1080/00103624.2016.1232098

Switchgrass (*Panicum virgatum* L.) from North Dakota—a New Bioenergy Crop for the Nemoral Zone of Europe

Eglė Norkevičienė, Nijolė Lemežienė, Jurgita Cesevičienė, and Bronislava Butkutė

Institute of Agriculture, Lithuanian Research Center for Agriculture and Forestry, Akademija, Kėdainiai District, Lithuania

ABSTRACT

Parallel to the growing interest in switchgrass (*Panicum virgatum* L.) in southern countries of Europe, there is enhanced interest in knowing about its potential adaptability in the European regions with cool and moderate climates. The objective of this work was to characterize important agricultural parameters of switchgrass originated from North Dakota in order to identify the most valuable accessions for further research, propagation, and breeding in the Nemoral zone of Europe. The selection aimed at evaluating overwintering and productivity of switchgrass, with the ultimate objective of biomass quality improvement. Field trials were carried out in the central lowland of Lithuania during 2012–2014 on 33 germplasm accessions of switchgrass originating from North Dakota. Allthe tested accessions exhibited almost similar overwinter survival rate, i.e., 93.7–96.7%. Significant differences were observed in mean dry matter yields of all the tested accessions harvested once or twice per season ($P < 0.05$). The higher yielding accessions during both study years were differentiated. The yield potential of these accessions depended on a number of morphological traits, including internode thickness, plant height, panicle length, and leaf and stem weight per tiller ($P < 0.05$). Ash and mineral composition was associated with the genotype and the year of biomass harvest ($P < 0.05$). The switchgrass genotypes originating from North Dakota appeared to be adaptable to the European environment with cool and moderate climate and short growing season. The best-performing accessions can serve as a valuable genetic source for future breeding programmes.

KEYWORDS
Biomass quality; dry matter yield; mineral composition; Nemoral zone; North Dakota; overwinter survival; switchgrass

Introduction

The advantages of C4 grasses over other energy plants have been highlighted; they have higher use efficiencies of nitrogen (N), water and light energy (Taylor et al. 2010), higher tolerance to abiotic stresses (Mitchell, Lee, and Casler 2014), and higher soil carbon storage potential (Liebig et al. 2008). Because of these attributes, C4 grasses can deliver sustainable and reliable yields over a range of agricultural locales and have potential for large-scale biomass production under variable environmental conditions under which they may not cause competition with production of food crops (Kryževičienė et al. 2011; Robbins et al. 2012). Therefore, the development of C4 photosynthesis-type perennial grasses for biomass production in Europe is now on the increase (Searle and Malins 2014).

Among the many alternative C4 bioenergy crops, notable attention has been given to switchgrass (*Panicum virgatum* L.) which is described as a high biomass-producing bunchgrass, native to the eastern two-thirds of the USA and belonging to the predominant species in tall grass prairies (Casler 2012; Moser and Vogel 1995). Switchgrass is a highly variable plant and can grow under a wide range

CONTACT Eglė Norkevičienė egle.norkeviciene@lzi.lt Institute of Agriculture, Lithuanian Research Center for Agriculture and Forestry, LT-58344, Instituto al. 1, Akademija, Kėdainiai District, Lithuania.

This article is part of a special issue on The 14th International Symposium on Soil and Plant Analysis (ISSPA), held in Kailua-Kona, Hawaii, USA from January 26-30, 2015.

© 2016 Taylor & Francis

of climatic conditions and is able to adapt the growth at different longitudes (Casler et al. 2007). This grass species exhibits the following advantages: its low-impact lignocellulosic biomass is produced at low cost (Butkutė et al. 2013); it can be grown on marginal and lower quality lands, and its biomass exhibits good combustion quality (McLaughlin and Kszos 2005). Switchgrass management in Europe as a bioenergy crop is relatively a new intervention. Results to date from various European studies have suggested that switchgrass is broadly adapted to many European countries. It is currently introduced into temperate regions of Europe, i.e., regions that lie between latitudes 40° 09′ N (Greece) and 52° 38′ N (the Netherlands) (Parrish, Casler, and Monti 2012).

The potential of switchgrass for adaptation in the northern regions of Europe has not been tested as yet. Lemežienė et al. (2015) have suggested that natural populations of switchgrass from North Dakota might have a high breeding value in the European regions with cool and moderate climates. However, there is a great uncertainty regarding identifying site-suited genotypes or breed germplasm in such regions described by a short growing season or 2718 growing degree days (i.e., the days warmer than 5°C). The advantage of switchgrass compared to native perennial grasses mainly appears to be in its integrated assessment, i.e., by weighing all the operational, economic, and environmental aspects (Kwit, Nageswara-Rao, and Stewart 2014). While researchers have realized this species as an ideal feedstock for second-generation biofuel systems or for direct combustion, it is hardly grown commercially in Europe. In Europe, the existing areas under this grass species are restricted to experimental plots or demonstration trials (Parrish, Casler, and Monti 2012).

Biomass productivity per unit area is clearly the most important determinant in selecting bioenergy crops in Europe. The literature shows that yield development of switchgrass takes time, biomass increases nine-fold in the third year of growth (Elbersen et al. 2001), and further increases in average yield are likely; its yield is determined by a range of factors including origin of the genotype. Obviously, the regional development of switchgrass genotypes is essential because of diverse adaptation of various genotypes in the given latitude or geographical area (Casler et al. 2007). It is observed that biomass yield is directly linked to morphological features, and phenotypic selection of individual plants with high yield potential could increase the harvestable biomass of switchgrass. Boe and Lee (2007) reported that biomass per tiller is an important indirect selection trait for switchgrass and significantly correlates with final biomass productivity. Plant height, number of tillers per plant, and phytomers number and size have a determining effect on the final biomass productivity (Cortese and Bonos 2013; Price and Casler 2014). These researchers observed that biomass yield of the species had varied relationships with various morphological traits depending on the ecotype, variety, and growing location.

Despite the fact that switchgrass is able to enhance biomass production in a wide range of environmental conditions, it appears that its potential in the northern regions of Europe is untested since no information on this aspect is available in the literature. The present study was conducted to investigate adaptational and morphological traits of switchgrass in order to identify the most valuable accessions for further research, propagation, and breeding in the Nemoral zone of Europe.

Material and methods

Plant material and trial conditions

The collection trials were carried out during 2012–2014 in the central lowland of Lithuania (55° 23′ 49′′ N; 23° 51′ 40′′ E) (Figure 1), at the Institute of Agriculture, Lithuanian Research Centre for Agriculture and Forestry. Seeds of the tested germplasm were obtained from the Plant Genetic Resources Conservation Unit of the United States Department of Agriculture and Agricultural Research Service. The germplasm collection comprised of 33 wild ecotypes of switchgrass originated from North Dakota. The collection was set up using 2-month old seedlings grown in a greenhouse. For the field trial, the seedlings were planted at a distance of 50 cm, in 50-cm apart rows, with seven plants per row and two rows per replication. The field trial was laid out in randomized complete

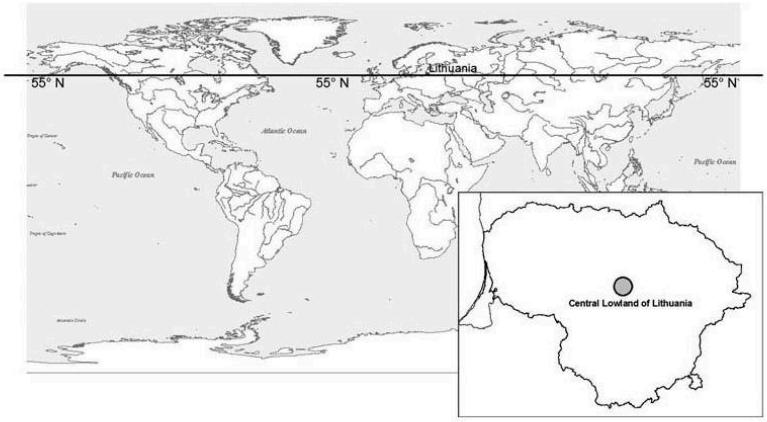


Figure 1. The location where the switchgrass study was performed in Lithuania.

block design with two replications, thus having a total of 28 plants per field trial. The ecotype classification (upland vs. lowland) of the accessions was not reported, but the morphology was consistent with the upland designation. The soil of the experimental site is classified as Endocalcari-Epihypogleyic Cambisol with the following characteristics of its plough layer (0–25 cm): pH_{KCl}, 6.3–7.3; humus content, 1.4–3.6%; available phosphorus pentoxide (P_2O_5), 143–265 mg kg^{-1}; available potassium oxide (K_2O), 109–209 mg kg^{-1}. Pre-planting fertilization comprised of 60 kg N ha^{-1}, 60 kg P_2O_5 ha^{-1}, and 60 kg K_2O ha^{-1}; and 60 kg N ha^{-1} was applied during each spring of the following years. The herbicide was applied to control weeds in the spring of 2013 and 2014, before switchgrass started growth.

According to the environmental stratification of Europe, Lithuania is located in the Nemoral zone with the cool temperate climate and a short growing season of 190–195 days (Metzger et al. 2012). The annual mean precipitation at the experimental site is 550–600 mm and the mean annual temperature is 6.0–6.5°C. The mean January temperature during 2012–2014 was −5.3°C and the mean July temperature was 19.1°C. Normally, average temperature in January, the coldest month in Lithuania, is −2.9°C, and in the warmest month of July is 19.7°C. However, during the 2012–2014 experimental period, the weather conditions markedly differed between years. The first season of 2012–2013 was characterized by a cold and long-lasting winter, very late, dry, and warm spring, and changeable summer with heat waves. The autumn–winter period of 2013–2014 was unusually warm as the prevalent temperatures remained positive, i.e., the average monthly temperatures in January and February were more than 5°C higher than the long-term mean temperature.

Evaluation of germplasm collection

The assessed traits of the collected germplasm during both years, i.e., 2013 and 2014, included winter injury, plant height, number of phytomers per tiller, number of tillers per bunch, upper internode length, internode thickness, flag leaf width and length, panicle length (excluding peduncle), number of generative tillers per plant, bunch diameter, dry biomass weight per tiller, phytomer number per tiller, upper internode length, thickness of internode, single plant fresh, and dry matter yield.

Overwinter survival was evaluated by counting dead plants in all replications. Winter injury was evaluated in the spring of 2013 following the first growing season. Plant height was recorded by

measuring the height of the tallest tiller of each plant from the ground level. Tiller count per bunch was measured by hand count of all tillers for each plant. Bunch diameter was measured immediately after harvesting at seed maturity stage. Five random tillers per plant from five plants per population were sampled to evaluate tillers and phytomer morphological traits such as phytomer number per tiller, upper internode length, internode thickness, and fresh and dry weight of tillers. Thickness of internode was measured on the middle third of the plant (i.e., generally between third and fourth nodes above the ground). In addition, biomass of a single tiller was separated into leaves (blades + sheaths), stem, and panicles and the percentage biomass of each fraction, based on dry mass, was determined.

Plants were not harvested during the establishment year (i.e., 2012) to enable them to become fully established. Biomass yields were recorded in years 2013 and 2014. To simulate the species management under commercial cultivation conditions, the grass was harvested in two cutting regimes. In the first regime, the grass was cut once at seed maturity stage for use as feedstock for second-generation bioethanol and as solid biofuel. In the second regime, the grass was cut twice per season: at beginning of anthesis and after re-growth of aftermath as a feedstock for biogas. Plants were clipped leaving 30-cm high stubbles. The average herbage yield for all cuts was determined by weighing all plants per plot and then the above-ground biomass yield was calculated on per plant basis. Dry matter yield was determined by drying 500 g herbage samples at 105°C to constant moisture.

Sample preparation and chemical analyses

Fresh plant samples, chopped into pieces of 3–5 cm length, were initially dried at 105°C for 15 min and then dried at 65 ± 5°C for 24 h and ground in a cyclonic mill with a 1 mm sieve. The ash content was determined by the standard method—consistent with CEN EN 14775:2009 (European Committee for Standardization 2009). Silicon (Si) content was determined on a Cary 50 UV-Vis spectrophotometer (Varian Inc., Santa Clara, CA, USA) according to the method of Dai et al. (2005) and Kraska and Breitenbeck (2010). Sulfur (S) and N were assessed by dry combustion on a CNS analyser (Elementar, Vario EL, Germany). Potassium (K), calcium (Ca), and magnesium (Mg) concentrations in the sulfuric acid digests were determined by atomic absorption spectrophotometry (AAS). Parameters of the AAnalyst 200 instrument (Perkin-Elmer, Norwalk, CT, USA) were chosen in accordance with the manufacturer's instructions. Chloride (Cl) content was determined by spectrophotometry at 460 nm wavelength (Gaines, Parker, and Gascho 1984; Liu 1998).

Statistical analysis

Means of dry matter yields were based on Fisher's protected least significant difference (LSD). Differences were considered to be significant at 95% and 99% level. Pearson's correlation coefficients were determined between single tiller dry matter yield and number of morphological traits within one and two cutting regimes using five higher yielding populations. Two-way analysis of variance (ANOVA) were performed to test the effects of year and genotype on mineral concentration in the biomass. ANOVAs were conducted using the statistical package Statistica 7 (StatSoft, Inc.) software.

Results and discussion

Winter injury

Previous studies have revealed that the ability of young plants to survive the first winter is the most serious limiting factor for crop establishment in the northern sites with relatively cold winters (Cortese and Bonos 2013). Winter injury of switchgrass was evaluated in the spring of 2013 following the first growing season. Based on the observations of this study, it appears that winter

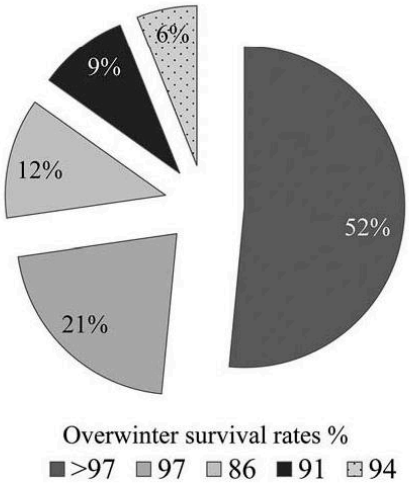


Figure 2. The first winter survival of the Lithuania-grown switchgrass originating from North Dakota. Numbers in the pie chart indicate percentage of accessions.

injury in switchgrass is most likely to occur during the establishment year when plants are less mature and have smaller root systems. In this study, during the first growing season, most of the wild ecotypes from North Dakota exhibited 100% overwinter survival rate or very low winter damage; all of the 33 populations survived, of which 52% of accessions had overwinter survival rates higher than 97% and none of the populations had a survival rate lower than 86% (Figure 2).

The data collected in the following years corresponded to the data of second growing season, as no winter injury was observed. This suggests that in Lithuania, wild ecotypes of switchgrass from North Dakota had favorable conditions to survive through the winter and, thus, can serve as a valuable genetic source for developing energy crops for growing in Nemoral zone of Europe. Winter injury can result not only from the genotypes' reaction to the environment and age of the plants, but also winter stress can occur at any time, especially if winter stress factors are high (Cortese and Bonos 2013). Therefore, the factors underlying winter injury of the switchgrass warrant long-term investigations.

Biomass yield

Following plant establishment, achieving higher biomass yield is the next important consideration for the energy crop domestication. The above-ground fresh matter yield of switchgrass determined from second- to third-year growth (not including the first year growth), where grass was cut once or twice per season, is shown in Figure 3. In the first treatment, when grass was cut once at seed maturity, fresh biomass yield varied two-fold, i.e., from 398 g per plant to 796 g per plant from first to second harvest year. In the second treatment, fresh biomass yield was higher in the first year of harvest reaching 681 g per plant. In the second year of harvest, fresh biomass yield decreased to 334 g per plant. This marked reduction in biomass yield is attributed to a decrease in the activity of plant growth points when the grass was cut twice. For this reason, much lower fresh biomass yield was produced compared to young plants of the first harvest year. Similar yield trends were reported by earlier researchers. For example, Parrish and Fike (2005) concluded that more frequent or ill-timed harvests result in reduced yield of switchgrass, especially over the long term. Other researchers

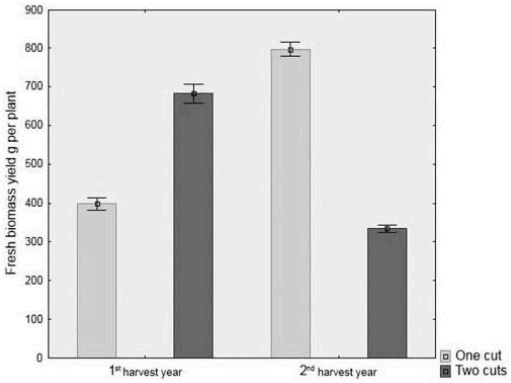


Figure 3. Fresh biomass yield of switchgrass in different harvest years when cut once and twice per season. Error bars indicate standard error.

have also stated that more frequent harvesting regimes than once per season may impoverish plants causing yield loss and declined plant vigor and overwinter survival (Beaty and Powel 1976; Trócsányi, Fieldsend, and Wolf 2009).

Dry matter yield was higher with one cut compared to two cuts both in 2013 and in 2014 (Figure 4). In the first treatment, when grass was cut once at seed maturity from first to second harvest year, dry matter yield increased 28% (from 248 g per plant to 317 g per plant). In the second treatment, when grass was cut twice per season (at the beginning of anthesis and after re-growth of aftermath) the dry matter yield was lower: in the first harvest year, the dry matter yield was 199 g per plant (20% less) and in the second harvest year, it was 88 g per plant (72% less). Thus, our study verified the results published by earlier researchers (Parrish and Fike 2005), showing that dry matter yield was higher in the treatment where the grass had been harvested once only at seed maturity stage. In the current study, comparing biomass partitioning among the tiller components under one and two cutting regimes revealed that the major fraction of biomass was the stem biomass when the grass was cut once only, and the major fraction of biomass was leaf biomass when the grass was cut twice (Figure 5).

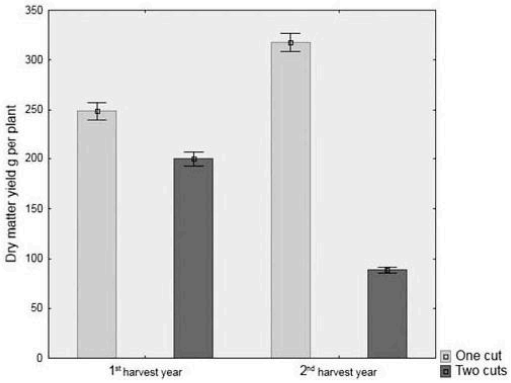


Figure 4. Dry matter yield of switchgrass in different harvest years when cut once and twice per season. Error bars indicate standard error.

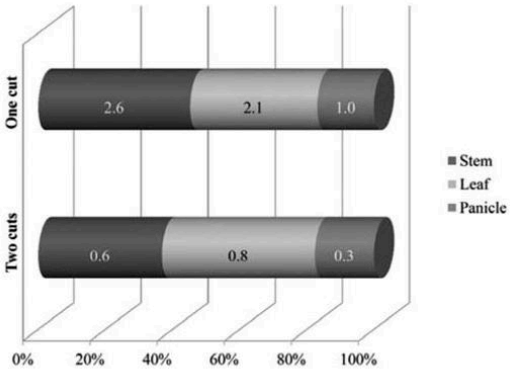


Figure 5. Distribution of biomass of switchgrass among tiller components under two cutting regimes. Numbers in columns are fresh biomass yield in grams per tiller.

Significant dry matter yield differences ($P < 0.05$) were observed among the switchgrass accessions over general mean biomass yield of the entire trial in both years. The accessions ranking changed from year to year, but top four accessions of switchgrass were higher yielding comparing with the general mean biomass yield of the entire trial during both years. The dry matter yield production observed for top five accessions was 12–34% higher than the general mean biomass yield of the entire trial during 2013 and 13–46% higher than the general mean biomass yield of the trial during 2014. The higher yielding accessions during both study years were identified; their yields increased progressively with advancement of plant age. In the first year of harvest, 2013, the highest yielding accession was LŽI-117; its dry matter yield increased by 35% from the first to the second harvest year. In the second year of harvest, 2014, the highest yielding accession was LŽI-118; its dry matter yield increased by 52% from the first to the second harvest year (Table 1).

This study also revealed that dry matter yield per tiller of switchgrass was correlated significantly with internode thickness, plant height, panicle length, leaf weight, and stem weight ($P < 0.01$). The correlations data were consistent between all measured traits for one and two cutting regimes (Figure 6). Grass yield is a complex trait influenced by many factors. Our study suggested that future breeding program of switchgrass must focus on its phenotypic traits, i.e., plant height and tiller diameter, for developing high biomass producing accessions.

Chemical composition

Biomass yield is the most important characteristic for selecting a grass genotype for sustainable bioenergy production. However, feedstock's chemical composition and its consistency, which directly influence conversion process yield, are also very important considerations for an energy feedstock biomass (Mitchell, Lee, and Casler 2014). The results in Table 2 indicate the mineral composition of switchgrass biomass harvested at seed maturity in order to ascertain genotypic and year effect on the investigated parameters. According to the two-way ANOVA, differences in mineral composition of switchgrass biomass between various accessions were larger than the variability associated with the year of biomass harvest. However, a small variation was observed in the investigated chemical composition of 2 years' harvested biomass. Biomass harvested in 2013 contained on average less ash, K, and Ca, but more Mg, silicon (Si), N, sulfur (S), and chlorine (Cl). The year effect on ash, Mg, and Si concentration in switchgrass biomass was insignificant.

Table 1. Mean annual dry matter yield of five high yielding accessions of switchgrass based on increase over general mean yield over 2013 and 2014.

Lithuanian catalogue No. of sample	PGRCU[a] code	Mean dry matter yield when cut twice per season[b]			Dry matter yield when cut once per season[c]
		First cut	Second cut	First + second cut	
g plant^{-1}					
2013—First harvest year					
LŽI-117	PI 642246	59.0	143.3	202.3	324.7**
LŽI-106	PI 642234	91.4*	156.6	247.9	324.7**
LŽI-118	PI 642247	49.4	188.5*	237.9	305.1*
LŽI-33	PI 642291	110.**	125.3	235.3	301.6
LŽI-113	PI 642242	51	156.4	207.4	270
Average of trial, n = 33		66.6	133.0	199.7	242.6
LSD_{05}		22.7	47.6	51.7	55.9
LSD_{01}		30.5	63.9	69.5	75.1
2014—Second harvest year					
LŽI-118	PI 642247	31.8*	97.6**	129.4**	463.6**
LŽI-117	PI 642246	28.6	82*	110.6*	437.4**
LŽI-113	PI 642242	24.8	65.9	90.7	398.2*
LŽI-115	PI 642244	22.1	87.5**	109.6	367.2
LŽI-106	PI 642234	30.9	69.6	100.4	359.1
Average of trial, n = 33		26.7	61.7	88.5	317.8
LSD_{05}		4.187	18.7	21.2	78.0
LSD_{01}		5.6	25.1	28.6	104.8

*, ** Significant at $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively.
[a]PGRCU—Plant Genetic Resources Conservation Unit of United States Department of Agriculture and Agricultural Research Service.
[b]Cut at the beginning of anthesis and after re-growth of aftermath.
[c]Cut at seed maturity.

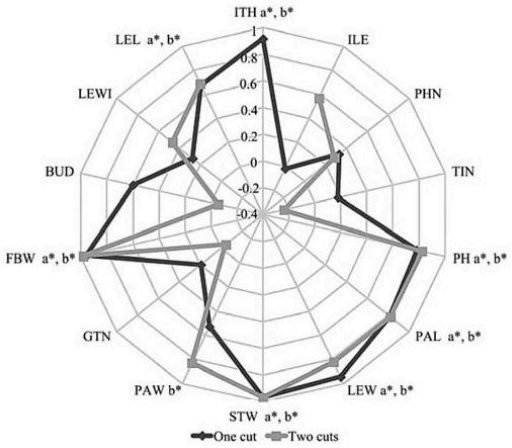


Figure 6. Correlation coefficients (r-values) between switchgrass dry matter yield per tiller and morphological traits under one and two cutting regimes.a*, Correlation coefficient at $P < 0.05$ of one cut regime; b*, Correlation coefficient at $P < 0.05$ of two cuts regime.; ITH, Internode thickness; ILE, Upper internode length; PHN, Number of phytomers per tiller; TIN, Number of tillers per bunch; PH, Plant height; PAL, Panicle length; LEW, Leaf weight per tiller; STW, Stem weight per tiller; PAW, Panicle weight per tiller; GTN, Number of generative tillers; FBW, Fresh biomass weight per tiller; BUD, Bunch diameter; LEWI, Leaf width; LEL, Leaf length.

The effect of the genotype on the biomass components was statistically significant for all the tested accessions ($P < 0.01$). Biomass of wild ecotypes LŽI-118 and LŽI-134 was characterized by significantly lower concentrations of K and Cl than the mean concentration of K and Cl per

Table 2. Variability of ash and mineral concentration in biomass of switchgrass harvested at seed maturity.

	Ash	K	Ca	Mg	Si	N	S	Cl
	g kg^{-1} Dry matter							
Variable	Significance of the factor							
Accession (A)	**	**	**	**	**	**	**	**
Year of study (Yr)	ns	**	**	ns	ns	*	**	**
A × Yr	**	**	*	*	*	**	**	**
Mean value per collection	54.7	12.6	5.80	2.64	2.88	7.50	1.15	3.49
Accession	Average value for accession							
LŽI-33	49.9**	12.8	5.03**	3.06**	2.85	7.70**	1.17	3.60
LŽI-57	55.0	14.2**	6.35**	2.88	2.53**	6.68**	1.00**	3.77*
LŽI-106	55.0	13.1	5.58	2.74	2.54**	8.46**	1.22**	4.04**
LŽI-117	53.7	11.3**	5.65	2.22**	2.77	6.30**	1.13*	4.30**
LŽI-118	51.6**	10.9**	5.45*	2.56	2.82	7.72**	1.29**	2.91**
LŽI-119	61.7**	13.9**	6.05	2.65	3.38**	7.93**	1.17	3.43
LŽI-134	56.4	11.9*	6.53**	2.39	3.25**	7.72**	1.11**	2.40**
LSD_{05}	1.98	0.57	0.324	0.260	0.198	0.129	0.019	0.226
LSD_{01}	2.76	0.79	0.452	0.362	0.277	0.180	0.026	0.315
Year of study	Average value for year							
2013	54.4	11.0**	4.76**	2.70	2.91	8.82**	1.34**	4.64**
2014	55.1	14.1**	6.84**	2.59	2.85	6.18**	0.96**	2.34**
LSD_{05}	0.81	0.23	0.13	0.11	0.08	0.05	0.009	0.09
LSD_{01}	1.13	0.32	0.18	0.15	0.11	0.07	0.010	0.13

*, ** Significant at $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively; ns, non-significant.

collection. The decrease of K and Cl concentration in switchgrass biomass is particularly important because both K and Cl are related to corrosion processes in the furnace, lessening the melting point of ash, and causing problems of slagging and fouling (Nielsen et al. 2000). The biomass of ecotype LŽI-119 was distinguished by significantly higher contents of ash and Si ($P < 0.01$). Only biomass of two ecotypes, i.e., LŽI-33 and LŽI-117, differed significantly in Mg concentration from the general mean Mg concentration. Earlier research has revealed relationships between several mineral components and the latitude of genotype origin of switchgrass accession (El-Nashaar et al. 2009). Since almost all of our investigated switchgrass accessions were from North Dakota, we could not clearly link mineral composition with latitude of origin of the accessions. Hence, our observations agree with the findings of the earlier researchers (El-Nashaar et al. 2009; Lemus et al. 2002) that growth environment, growth years and genetics cause significant variation in feedstock composition.

Our study was limited to mineral composition of switchgrass biomass harvested at seed maturity. The biomass quality at this plant development stage did not show excellent properties required for feedstock of sustainable solid biofuel. Management practices or other means for reducing the amount of ash and mineral composition in biomass are exceptionally important for improving the combustion quality of the plant biomass. One management strategy could be delaying of biomass harvesting, as with plant senescence during autumn, many minerals from annual plant tissues (leaves, stems, panicles) are translocated to the perennial tissues including crowns and roots (Kludze, Deen, and Dutta 2011). Further studies are suggested to arrive at appropriate management strategies to lower the concentration of undesirable elements in the switchgrass biomass.

Conclusions

The genotypes of switchgrass that originated from North Dakota appear to be adaptable in the Nemoral zone of Europe because of their high overwinter survival rates and high biomass yield. Biomass yield increased with each harvest year when switchgrass was harvested once per season. High yielding and winter-hardy six wild ecotypes (i.e., LŽI-117, LŽI-118, LŽI-115, LŽI-106, LŽI-33, LŽI-113) from North Dakota are best suited for biofuel production. Genotypic variability existed in

concentration of biomass components that have an impact on air pollution and corrosion of combustion equipment, as well as on slagging; differences among accessions were greater than differences among years of harvest. Further research is needed to determine the optimal harvesting time which would harmonize the quality and yield of biomass under climatic conditions of the Nemoral zone.

Funding

This research was funded by grant No. MIP-073/2012 from the Research Council of Lithuania.

ORCID

Bronislava Butkutė http://orcid.org/0000-0002-4795-5723

References

Beaty, E. R., and J. D. Powel. 1976. Response of switchgrass (Panicum virgatum) to clipping frequency. *Journal of Range Management* 29:132–35. doi:10.2307/3897409.

Boe, A., and D. K. Lee. 2007. Genetic variation for biomass production in prairie cordgrass and switchgrass. *Crop Science* 47:929–34. doi:10.2135/cropsci2006.05.0323.

Butkutė, B., N. Lemežienė, J. Cesevičienė, Ž. Liatukas, and G. Dabkevičienė. 2013. Carbohydrate and lignin partitioning in switchgrass (*Panicum virgatum* L.) biomass as a bioenergy feedstock. *Zemdirbyste-Agriculture* 100 (3):251–60. doi:10.13080/z-a.2013.100.032.

Casler, M. D. 2012. Switchgrass breeding, genetics, and genomics. In *Switchgrass: A valuable biomass crop for energy*, ed. A. Monti, 29–53. London: Springer Science & Business Media.

Casler, M. D., K. P. Vogel, C. M. Taliaferro, N. J. Ehlke, J. D. Berdahl, E. C. Brummer, R. L. Kallenbach, C. P. West, and R. B. Mitchell. 2007. Latitudinal and longitudinal adaptation of switchgrass populations. *Crop Science* 47:2249–60. doi:10.2135/cropsci2006.12.0780.

CEN EN. 14775: 2009. *Solid biofuels – determination of ash content. European Committee for Standardization.* Brussels, Belgium Management Center..

Cortese, L. M., and S. A. Bonos. 2013. Bioenergy traits of ten switchgrass populations grown in the Northeastern/Mid-Atlantic USA. *BioEnergy Research* 6 (2):580–90. doi:10.1007/s12155-012-9271-6.

Dai, W. M., K. Q. Zhang, B. W. Duan, C. X. Sun, K. L. Zheng, R. Cai, and J. Y. Zhuang. 2005. Rapid determination of silicon content in rice. *Rice Science* 12 (2):145–47.

Elbersen, H. W., D. G. Christian, N. El Bassem, E. Alexopoulou, V. Pignatelli, and D. Van Den Berg. 2001. Switchgrass (*Panicum virgatum* L.) as an alternative energy crop in Europe: Initiation of a productivity network. Final report FAIR 5-CT97-3701:91. http://www.switchgrass.nl/upload_mm/6/3/7/c9842903-b468-436a-8412-9f47c296b2de_Sw_FinalRep_full2.pdf

El-Nashaar, H. M., G. M. Banowetz, S. M. Griffith, M. D. Casler, and K. P. Vogel. 2009. Genotypic variability in mineral composition of switchgrass. *Bioresource Technology* 100 (5):1809–14. doi:10.1016/j.biortech.2008.09.058.

Gaines, T. P., M. B. Parker, and G. J. Gascho. 1984. Automated determination of chlorides in soil and plant tissue by sodium nitrate. *Agronomy Journal* 76:371–74. doi:10.2134/agronj1984.00021962007600030005x.

Kludze, H., B. Deen, and A. Dutta. 2011. Report on literature review of agronomic practices for energy crop production under Ontario conditions. University of Guelph. http://www.ofa.on.ca/uploads/userfiles/files/u%20of%20g%20ofa%20project-final%20report%20july%2004-2011%20(1).pdf.

Kraska, J. E., and G. A. Breitenbeck. 2010. Simple, robust method for quantifying silicon in plant tissue. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 41:2075–85. doi:10.1080/00103624.2010.498537.

Kryževičienė, A., Ž. Kadžiulienė, L. Šarūnaitė, Ž. Dabkevičius, V. Tilvikienė, and J. Šlepetys. 2011. Cultivation of Miscanthus × giganteus for biofuel and its tolerance of Lithuania's climate. *Zemdirbyste-Agriculture* 98 (3):267–74.

Kwit, C., M. Nageswara-Rao, and C. N. Stewart Jr. 2014. Switchgrass (Panicum virgatum L.) as a bioenergy crop: Advantages, concerns, and future prospects. *Compendium of Bioenergy Plants: Switchgrass* 14:403–20.

Lemežienė, N., E. Nokevičienė, Ž. Liatukas, G. Dabkevičienė, J. Cecevičienė, and B. Butkutė. 2015. Switchgrass from North Dakota – an adaptable and promising energy crop for northern regions of Europe. Acta Agriculturae Scandinavica. *Section B – Soil & Plant Science* 65 (2):118–24.

Lemus, R., E. C. Brummer, K. J. Moore, N. E. Molstad, C. L. Burras, and M. F. Barker. 2002. Biomass yield and quality of 20 switchgrass populations in southern Iowa, USA. *Biomass Bioenergy* 23 (6):433–42. doi:10.1016/S0961-9534(02)00073-9.

Liebig, M. A., M. R. Schmer, K. P. Vogel, and R. B. Mitchell. 2008. Soil carbon storage by switchgrass grown for bioenergy. *BioEnergy Research* 1:215–22. doi:10.1007/s12155-008-9019-5.

Liu, L. 1998. Determination of chloride in plant tissue. In *Handbook of reference methods for plant analysis*, ed. Y. P. Kalra, 111–13. Boca Raton, Florida: CRC Press.

McLaughlin, S. B., and L. A. Kszos. 2005. Development of switchgrass (Panicum virgatum L.) as a bioenergy feedstock in the United States. *Biomass & Bioenergy* 28:515–35. doi:10.1016/j.biombioe.2004.05.006.

Metzger, M. J., A. D. Shkaruba, R. H. G. Jongman, and R. G. H. Bunce. 2012. Descriptions of the European environmental zones and strata. Wageningen, The Netherlands: Alterra Report 2281. http://content.alterra.wur.nl/Webdocs/PDFFiles/Alterrarapporten/AlterraRapport2281.pdf. http://content.alterra.wur.nl/Webdocs/PDFFiles/Alterrarapporten/AlterraRapport2281.pdf.

Mitchell, R., D. K. Lee, and M. Casler. 2014. Switchgrass. In *Cellulosic energy cropping systems*, ed. D. L. Karlen, 75–90. Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons.

Moser, L. E., and K. P. Vogel. 1995. Switchgrass, Big bluestem and Indiangrass. In *Forages: An introduction to grassland agriculture*, ed. R. F. Barnes, D. A. Miller, and J. C. Nelson, Vol. 1, 409–20. Ames Iowa, USA: Iowa State University Press.

Nielsen, H. P., F. J. Frandsen, K. Dam-Johansen, and L. L. Baxter. 2000. The implications of chlorine-associated corrosion on the operation of biomass-fired boilers. *Progress in Energy and Combustion Science* 26:283–98. doi:10.1016/S0360-1285(00)00003-4.

Parrish, D. J., M. D. Casler, and A. Monti. 2012. The evolution of switchgrass as an energy crop. In *Switchgrass*, eds A. Monti, 1–28. London, UK: Springer.

Parrish, D. J., and J. H. Fike. 2005. The biology and agronomy of switchgrass for biofuels. *Critical Reviews in Plant Sciences* 24:423–59. doi:10.1080/07352680500316433.

Price, D. L., and M. D. Casler. 2014. Divergent selection for secondary traits in upland tetraploid switchgrass and effects on sward biomass yield. *BioEnergy Research* 7:329–37. doi:10.1007/s12155-013-9374-8.

Robbins, M. P., G. Evans, J. Valentine, I. S. Donnison, and G. G. Alison. 2012. New opportunities for the exploitation of energy crops by thermochemical conversion in Northern Europe and the UK. *Progress in Energy and Combustion Science* 38:138–55. doi:10.1016/j.pecs.2011.08.001.

Searle, S. Y., and C. J. Malins. 2014. Will energy crop yields meet expectations? *Biomass & Bioenergy* 65:3–12. doi:10.1016/j.biombioe.2014.01.001.

Taylor, S. H., S. P. Hulme, M. Rees, B. S. Ripley, F. I. Woodward, and C. P. Osborne. 2010. Ecophysiological traits in C3 and C4 grasses: A phylogenetically controlled screening experiment. *New Phytologist* 185 (3):780–91. doi:10.1111/j.1469-8137.2009.03102.x.

Trócsányi, Z. K., A. F. Fieldsend, and D. D. Wolf. 2009. Yield and canopy characteristics of switchgrass (Panicum virgatum L.) as influenced by cutting management. *Biomass & Bioenergy* 33 (3):442–48. doi:10.1016/j.biombioe.2008.08.014.

This is the authors accepted manuscript of an article published as the version of record in Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science on 27th October 2014. http://www.tandfonline.com/ https://doi.org/10.1080/09064710.2014.972973

Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science, 2014
http://dx.doi.org/10.1080/09064710.2014.972973

Taylor & Francis
Taylor & Francis Group

ORIGINAL ARTICLE

Switchgrass from North Dakota – an adaptable and promising energy crop for northern regions of Europe

Nijolė Lemežienė, Eglė Norkevičienė, Žilvinas Liatukas*, Giedrė Dabkevičienė, Jurgita Cecevičienė and Bronislava Butkutė

Institute of Agriculture, Lithuanian Research Centre for Agriculture and Forestry, Instituto al. 1, LT-58344 Kėdainiai D., Akademija, Lithuania

(*Received 26 June 2014; accepted 30 September 2014*)

Downloaded by [Lzuu Library] at 09:39 30 October 2014

Searching for novel energy crops, an interest in C4-type plant switchgrass (SWG) has increased worldwide. The present research was aimed to study SWG genetic resources for most important agrobiological traits with a view of extending the range of energy plants in the Nemoral zone of Europe. SWG was studied for the peculiarities of developmental stages, winter hardiness, and dry matter (DM) yield. SWG regrowth in spring started one month later compared to the reed canary grass (variety 'Chiefton'). All investigated genotypes matured seeds in the second half of September. The most winter-hardy SWG accessions (0–20% winter damage) were the majority of wild ecotypes and the variety 'Dacotah' from North Dakota (2–4 hardiness zone) as well as the variety 'Summer' from South Nebraska (4, 5 hardiness zone). Ecotypes from North Dakota exhibited a high breeding potential and prospects in Northern regions of Europe due to genotypic variation of winter hardiness trait. The varieties 'Alamo', 'Falcon', 'Grenville', 'Shawnee', and 'Trailblazer' that originated from warmer climate zones (6–9 hardiness zone) were heavily damaged or completely killed. The worst overwinter survival of plants was recorded after the first winter. DM yield was estimated at two regimens of cutting. When grass was cut once at seed maturity stage, DM yield in the first harvest year was 249 g per plant, in the second harvest year 349 g per plant, and in the third harvest year 493 g per plant. When grass was cut twice per season (at the beginning of anthesis and after regrowth of aftermath), DM yield was significantly lower: in the first harvest year the DM yield was 203 g per plant (18.4% less), in the second harvest year 182 g per plant (47.9% less), and in the third harvest year 272 g per plant (44.7% less).

Keywords: winter; hardiness zone; North Dakota; *Panicum virgatum* L.; wild ecotypes

Introduction

The necessity for developing a sustainable non-fossil fuel economy is self-evident and has been highlighted in many recent reviews (Sims et al. 2010; Haberl et al. 2011; Robbins et al. 2012). It is anticipated by many that sustainably produced plant biomass will come to hold a prominent place as a source of renewable energy (Kryževičienė et al. 2011; Robbins et al. 2012).

Switchgrass (SWG; *Panicum virgatum* L.) is considered to be a promising candidate for second-generation energy crops (Zeng-Hui & Hong-Bo 2010; Robbins et al. 2012), because of its potential for high yields, low environmental impact, and low input requirements (Edward et al. 2009). Xerotrophic warm-season C4 grass species are better adapted to changing climate conditions than C3 species, mainly due to higher utilization efficiency of water, nitrogen, and other elements (Byrt et al., 2011).

SWG is a warm-season grass species native to the tall grass prairie region of North America including the southern Canadian prairie and is adapted to regions of North America up to the latitude 55°N (Moser & Vogel 1995). Two distinct cytotypes exist in SWG, upland and lowland (Hultquist et al. 1996), which are generally defined based on morphological characteristics and habitat preferences (Casler 2012). SWG is a highly variable plant and can grow under a wide range of climatic conditions. Growth

*Corresponding author. Email: liatukas@lzi.lt

© 2014 Taylor & Francis

rate, photoperiodism, heat, and cold or freezing tolerance regulate adaptation of SWG populations (Casler et al. 2007). The latitude of origin has a large impact on SWG yield potential and ability to survive in extreme environment (Castler et al. 2007; Jefferson & McCaughey 2012). In general, SWG varieties grown too far north (from the latitude of origin) will not flower or will flower later and will not mature before onset of winter. This will lead to relatively high yields in the first year but it will also lead to winter damage of the stand and less regrowth in spring (Casler et al. 2007).

As a C4 perennial grass species capable of producing high biomass in warm climates, SWG is suitable for growing in the cool and temperate regions of the world also (Stander 1989; Robbins et al. 2012). This grass has been studied for lignocellulosic biomass conversion to fuel-grade ethanol in the southern countries of Europe (Piscioneri et al. 2001; Sharma et al. 2003; McLaughlin & Kszos 2005; Alexopoulou et al. 2008), but the Baltics regions could be its northern limits of adaptation (Barney & Di Tomaso 2011). From the current data on SWG experiments in Europe, it appears that it may be grown further north than in North America (Elbersen et al. 2001; Barney & Di Tomaso 2011). Cultivation of SWG in the European countries with cool and moderate climates will require cultivars adapted to northern latitudes. However, the species has received relatively little attention concerning the possibilities of its cultivars adaptability in the countries with cool and moderate climates (Robbins et al. 2012).

The present research was aimed to study SWG genetic resources for most important agrobiological traits with a view of extending the range of energy plants in the Nemoral zone of Europe.

Materials and methods

Plant material and trial conditions

Experiments were carried out in the Central Lowland of Lithuania (55°23′49″N; 23°51′40″E), at the Institute of Agriculture, Lithuanian Research Centre for Agriculture and Forestry during 2010–2013. The experimental collection of SWG was set up using seedlings grown in a greenhouse. Seeds for the germplasm collection were obtained from the Plant Genetic Resources Conservation Unit of the United States Department of Agriculture (USDA) and Agricultural Research Service. The tested accessions included 9 varieties, 2 breeding lines, and 60 wild ecotypes. Each accession consisted of 32 plants spaced 0.5 m apart with seven plants per row, two rows per replication, and two replications per treatment. The geographical origin of the accessions used in the study is indicated on the map (Figure 1).

The soil of the experimental site is *Endocalcari-Epihypogleyic Cambisol* (CMg-p-w-can). Fertilizer ($N_{60}P_{60}K_{60}$) was applied pre-planting once and

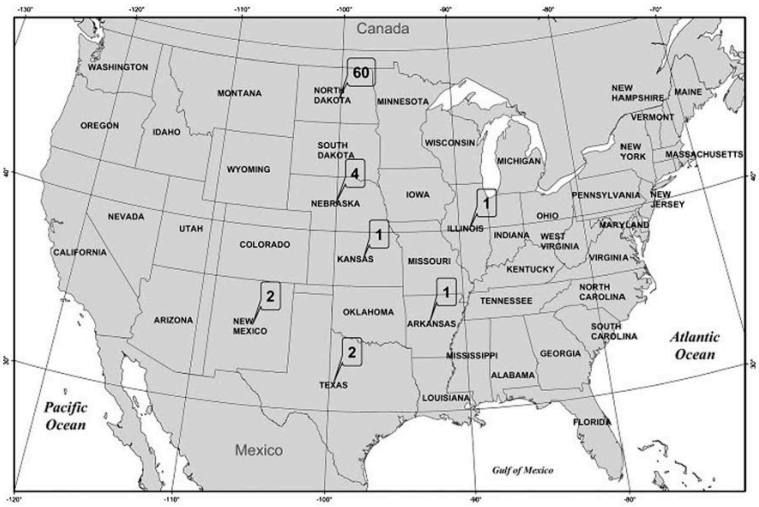


Figure 1. The map shows the number and the origin of the switchgrass (SWG) accessions tested.

Downloaded by [Lzuu Library] at 09:39 30 October 2014

Downloaded by [Lzuu Library] at 09:39 30 October 2014

N_{60} was applied each spring of the following years. Weeds were controlled by herbicides every year.

The weather conditions of the experimental period markedly differed between seasons. The first season 2010/2011 was characterized by a cold winter, wet summer, and autumn; the second season (2011/2012) by a mild winter, early spring, and wet summer; the third season (2012/2013) by a cold and long-lasting winter, very late, dry, and warm spring, and changeable summer with heat waves.

Evaluation of germplasm collection

The following traits were assessed: winter damage, regrowth at the beginning of vegetation, beginning of heading, dry matter (DM) yield, and others. SWG developmental stages were compared with those of reed canary grass (RCG) variety 'Chiefton'.

Overwinter survival was evaluated by counting dead plants in all replications. By overwintering performance, the genotypes were divided into three groups: none or very low winter damage (0–20%), intermediate winter damage (21%–80%), and very high winter damage (81%–100%). Damage of plants in all germplasm collections was evaluated after the first winter (in the first harvest year). A total of 71 accessions were evaluated: 2010 (n – 20), 2011 (n – 18), and 2012 (n – 33).

For DM yield evaluation in 2013, the collection set up in 2012 was qualified as germplasm collection of the first harvest year, collection set up in 2011 as germplasm collection of the second harvest year, and collection set up in 2010 as germplasm collection of the third harvest year.

Simulating the species management under commercial cultivation conditions, the grass was harvested using two cutting regimens. In the first regimen, the grass was cut once at seed maturity stage as a feedstock for second-generation bioethanol and for solid biofuel. In the second regimen, the grass was cut twice per season: at the beginning of anthesis and after regrowth of aftermath as a feedstock for biogas. Average herbage yield (grams per plant) for all cuts was determined having weighed all plants per plot. DM yield was measured in 500-g herbage samples dried to constant moisture.

Statistical analysis

Differences between means of DM yield were examined using independent-samples t test (bilateral). The pareto graph was used to show overwinter survival rates between wild ecotypes of SWG. The graph was carried out running Microsoft®Excel Analysis ToolPak. Linear regressions were computed and determination coefficient was estimated between traits and latitudes of the accession origin using the software Statistica 12 (StatSoft, Inc.).

Results and discussion

Dates of some plant developmental phases

Vegetation of SWG started one month later than that of RCG variety 'Chiefton' (Table 1). In this respect Lithuania is not exceptional, since literature sources indicate that this species start vegetation as late as the beginning of May (Lewandowskia et al. 2003; Casler 2012). Plants of different SWG genotypes started anthesis one and a half months later and seeds matured two months later than that of RCG variety 'Chiefton'. SWG plants usually mature late compared to the other grasses but all SWG genotypes matured seeds in the second half of September. Seed maturity time is not a limiting factor for SWG growing in Lithuania.

Winter damage

The ability of young plants to survive the first winter is the most serious limiting factor for crop establishment at the northern sites with relatively cold winters. Resistance to winter damage is one of the most important factors determining success of plant

Table 1. Comparison of the descriptors of switchgrass and RCG variety 'Chiefton' (average dates of 2010 and 2011 collections).

Descriptors	SWG (n – 38)	RCG variety 'Chiefton'
2012 period of vegetation		
Early spring growth	1–10/05	05/04
Earliness (time of 50% inflorescence emergence)	10–20/07	29/05
Seed maturity (end)	10–20/09	12/07
2013 period of vegetation		
Early spring growth	09–11/05	19/04
Earliness (time of 50% inflorescence emergence)	30/06–23/07 (mostly–08/07)	29/05
Seed maturity (end)	20–30/09	28/07

SWG, Switchgrass.

Table 2. Evaluation of first-winter damage in switchgrass (SWG) collections, established in 2010, 2011, and 2012.

Winter damage	Collection	Plant Genetic Resources Conservation Unit, Accession number	Variety/ecotype	Geographic origin	USDA hardiness zones
None or very low 0–20%	2010	PI642191	'Summer'	South Nebraska	4, 5
		PI642194; PI642195; PI642295–PI642300; PI642302–PI642308	Wild ecotypes	North Dakota	2, 3, 4
	2011	PI537588	'Dacotah'	North Dakota	2, 3, 4
		PI642200	Wild ecotype	North Dakota	2, 3, 4
	2012	PI642232–PI642235; PI642242; PI642244-PI642247; PI642256-PI642259; PI642261-PI642265; PI642291-PI642293; PI642310-PI642313; PI612296; PI642299; PI642306	Wild ecotypes	North Dakota	2, 3, 4
Intermediate 21–80%	2010	PI642301; PI642309	Wild ecotypes	North Dakota	2, 3, 4
	2011	PI477003	'Nebraska 28'	North Nebraska	3, 4
		PI642197–PI642199; PI642201; PI642203-PI642205; PI642208; PI648366	Wild ecotypes	North Dakota	2, 3, 4
	2012	PI642260; PI642243; PI642286	Wild ecotypes	North Dakota	2, 3, 4
Very high 81–100%	2010	PI642190	'Falcon'	New Mexico	4, 5, 6
		PI642192	'Pathfinder'	Nebraska/Kansas	4, 5
	2011	PI549094	'Trailblazer'	Nebraska	3, 4
		PI591824	'Shawnee'	South Illinois	5, 6, 7
		PI607837	Wild ecotype	North Dakota	2, 3, 4
		PI607838; PI421999	Breeding lines	Texas	6, 7, 8, 9
		PI476292	Wild ecotype	Arkansas	6, 7
	2012	PI414066	'Grenville'	New Mexico	4, 5, 6
		PI422006	'Alamo'	Texas	6, 7, 8, 9

introduction. Plants winter hardiness areas and their temperature amplitudes by geographical origin are determined in USDA Plant Hardiness Zone Map (http://www.usna.usda.gov/Hardzone/ushzmap.html). A comparison of mean minimal temperature intervals of Lithuanian climatic areas with the USDA system areas and subareas showed that Lithuanian climatic conditions are equal to 5a (eastern part of Lithuania), 5b (central part of Lithuania), and 6a (western part of Lithuania) areas of temperature amplitudes of plants winter hardiness (Navys 2008). It is recommended that SWG cultivars should not be planted more than one hardiness zone north of their area of origin (Sanderson et al. 2012). Our research data showed that the best overwintering after the first winter was characteristic of SWG genotypes that originated from North Dakota (2, 3, and 4 areas of plants hardiness zone; Table 2).

Lithuanian climatic conditions are not very severe (research was done in the central part of Lithuania in 5b hardiness zone), but due to specific climatic conditions during winter (frequent snow breaks, ice crust, thin snow cover) the best survival rate was shown by the majority of wild ecotypes and cultivars that originated from North Dakota region with a more severe climate. Varieties that originated from Texas, Arkansas, New Mexico, and South Illinois states with a warmer climate (6–9 hardiness zones) were damaged much more or were completely killed. USDA hardiness zones provide an excellent framework for defining local conditions and for choosing germplasm for use in breeding programs.

The varieties 'Falcon' (New Mexico) and 'Pathfinder' (Nebraska/Kansas) did not survive the first winter in the collection established in 2010 (Table 2). All wild ecotypes from North Dakota and variety 'Summer' from South Nebraska overwintered very well. Plants that survived the first winter showed no losses during the two following winters (2011/2012 and 2012/2013).

Variety 'Dacotah' and wild ecotype PI642200 that originated from North Dakota overwintered the best during 2011/2012 in the collection established in 2011. Two breeding lines (PI607837 and PI607838) from Texas, varieties 'Trailblazer' (Nebraska) and 'Shawnee' from South Illinois, wild ecotypes PI476292 from Arkansas and PI421999 from North Dakota did not overwinter (Table 2). The plants that had survived this winter showed good overwintering results in 2012/2013.

Varieties 'Grenville' (New Mexico) and 'Alamo' (Texas) did not overwinter in the collection established in 2012; however, most of the wild ecotypes from North Dakota showed 100% overwinter survival rate or very low winter damage.

The strongly photoperiodic nature of SWG, combined with apparent genetic variation for cold tolerance, indicates that SWG genotypes have a limited

Downloaded by [Lzuu Library] at 09:39 30 October 2014

adaptation zone compared to the species as a whole (Casler 2005). In order to introduce SWG to northern regions of Europe, it is very important to know its cold tolerance in the area outside its native distribution. As a result, the relationship between overwinter survival rates and latitudes of population origin were also examined in the central part of Lithuania. The optimal latitude for growing a specific SWG variety differs between Europe and North America (Sanderson et al. 2012). From the recent data on SWG grown in Europe, it appears that this species may be grown further north than in North America (Elbersen et al. 2001; Barney & Di Tomaso 2011). Longitudinal response by SWG populations is less defined than latitudinal responses and is variety specific (Sanderson et al. 2012). Geographical position of Lithuania is 53°53' and 56°27' of the North latitude and 20°58' and 26°50' East longitude (Navys 2008). The cooler temperatures and shorter growing seasons typical of Lithuania are major limiting factors to warm-season grass production in these areas. The Baltic Sea impacts on Lithuanian climate and plant hardiness during dormancy period and at the beginning of vegetation.

Our research correlation analyses indicated that overwinter survival rates of SWG in Lithuania are positively correlated with the latitudes of SWG accessions origin (Figure 2). These results suggest that SWG varieties and ecotypes of the northern origin have the highest cold tolerance and show better overwinter survival than southern ones when grown at the same latitude.

Estimating the genetic variability of wild progenitors especially for adaptive and production-related traits is a reasonable starting point of new crop domestication (Sang & Zhu 2011). Results of SWG first year overwintering in Lithuania show that natural population from North Dakota has high

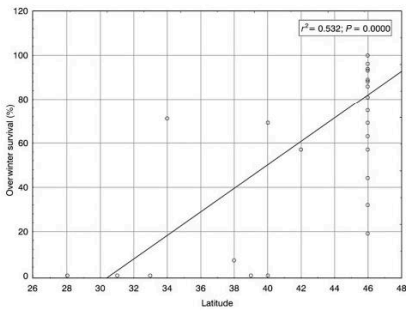


Figure 2. The relationship between switchgrass (SWG) overwinter survival and accessions' origin.

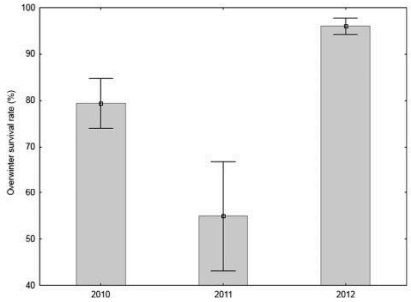


Figure 3. Overwinter survival rates in different collections of wild ecotypes of switchgrass (SWG) from North Dakota.
Note: Error bars indicate confidence interval at $P < 0.05$.

breeding value due to its high winter hardiness. After the first winter season, the populations of wild ecotypes of SWG had overwinter survival rates higher than 50% in all collections (Figure 3). This suggests that in Lithuania, SWG wild ecotypes from North Dakota had favorable conditions to survive through the winter.

The conditions during the 2010/2011 and 2012/2013 winters were unfavorable for SWG overwintering due to severe weather, long period with a stable thick snow cover, and deeply frozen soil. However, the survival rate of the wild SWG ecotypes from North Dakota was high and reached 79% and 96%, respectively. Conversely, the winter of 2011/2012 was mild but the survival rate of SWG ecotypes from North Dakota of the collection established in 2011 was much lower. This uncommon relationship can be explained by the fact that in 2011 establishment year plants were weaker before the onset of winter and that their dormancy might have been broken because of unstable, mild winter. As a result, to compare overwinter survival rates between ecotypes of SWG from North Dakota in the same year, we chose the 2010 and 2012 collections. In the 2010 collection, the ecotypes with none or very low winter damage accounted for about 33% (Figure 4). Whereas in the collection of 2012 establishment year, such SWG wild ecotypes were more frequent (above 80%), and complete (100%) overwintering was characteristic of 51% of wild SWG ecotypes. As mentioned above, overwintering conditions during 2010/2011 and 2012/2013 were similar. The slightly poorer overwintering of the collection established in 2010 could have been caused by a thaw in February. A short spell of cold weather occurred after complete thaw. These weather conditions might have had a negative effect on overwintering. The differences in

Downloaded by [Lzuu Library] at 09:39 30 October 2014

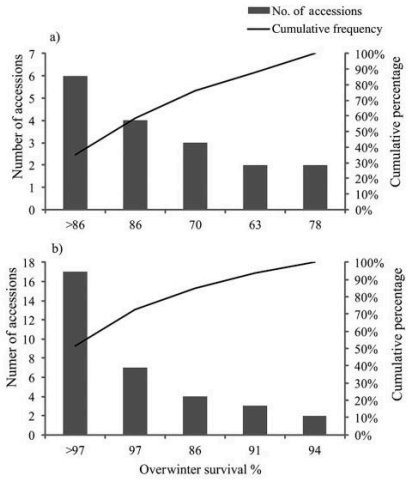


Figure 4. Pareto graph of the first winter survival of switchgrass (SWG) wild ecotypes originated from North Dakota in 2010 (a) and 2012 (b) collections.

overwintering among the genotypes are likely to have resulted from different genotype reaction to the environment. Therefore, further long-term research is needed to select the most winter-hardy wild ecotypes of SWG for the northern regions of Europe.

The age of plants might have affected their overwintering. The worst overwintering was exhibited by plants in the year of establishment when root system was weaker. In later years, the plants that had survived the first winter, showed a good overwintering rate. Other researchers have reported the same trend (Elbersen et al. 2001).

The analysis of the overwintering results of wild ecotypes, breeding lines and cultivars showed that SWG originated from 2–4 plant hardiness zones were the hardiest under Lithuanian conditions. These were the majority of wild ecotypes and variety 'Dacotah' from North Dakota and variety 'Summer' from South Nebraska.

DM yield

In addition to the growth traits, we compared DM yield per plant in order to better project the yield potential of the energy crop. The results of this study demonstrate that the highest DM yield was formed in the treatment with one cut per season at seed maturity stage (Figure 5). This trend has been reported by other researchers (Lemus 2004; Parish

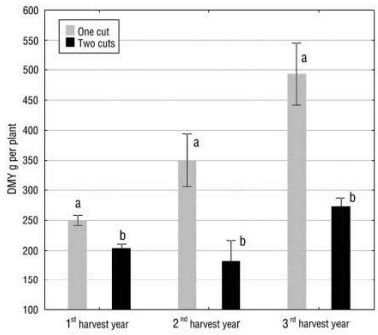


Figure 5. Dry matter (DM) yield of switchgrass (SWG) in different harvest-year collections cut once and twice in 2013.
Note: Different letters indicate significant differences (first harvest year $P < 0.05$, second and third $P < 0.01$) between means of DM yield gram per plant (DMY) at one and two cuts in 2013. Error bars indicate standard error.

& Fike 2005). Lewandowskia et al. (2003) suggests that two grass harvests are optimal for this species and their DM yield can be similar. We compared DM yield of all collections where grass was harvested once or twice in 2013. Our data showed a trend that DM yield was higher in the treatment where grass had been harvested once at seed maturity stage (Figure 5).

In the first treatment, when grass was cut once at seed maturity, DM yield in the first harvest year was 249 g per plant, in the second harvest year it was 349 g per plant, and in the third harvest year it was 493 g per plant. In the second treatment, when grass was cut twice per season (at the beginning of anthesis and after regrowth of aftermath) the DM yield was lower. In the first harvest year, the DM yield was 203 g per plant (18.4% less), in the second harvest year 182 g per plant (47.9% less), and in the third harvest year 272 g per plant (44.7% less). The marked reduction of DM yield in the second and third harvest years can be explained by a decrease in the activity of plant growth points when grass was cut twice. Such harvesting regimen impoverished the plants. For this reason, much lower DM yield was produced compared to young plants of the first harvest year. The means of DM yield of one and two cuts were significantly different in each collection (first harvest year $P < 0.05$, second and third – $P < 0.01$).

According to literature, harvesting at different plant development stages affects the physiological capability of growing points (axillary buds) to grow

Downloaded by [Lzuu Library] at 09:39 30 October 2014

(Parish & Fike 2005). Our research results confirm that DM yield depends on plant development stage and moisture content at harvesting. The higher DM yield at seed maturity stage was associated with lower moisture content in plants: the mean grass moisture content at the seed maturity stage was 59.1% and at the tillering and beginning of anthesis it was 73.4%.

Funding

This research was funded by the Research Council of Lithuania [grant number MIP-073/2012].

References

Alexopoulou E, Sharma N, Paptheohari Y, Christou M, Piscioneri I, Panoutsou C, Pignatelli V. 2008. Biomass yields for upland and lowland switchgrass varieties grown in the Mediterranean region. Biomass Bioenergy. 32:926–933.

Barney JN, DiTomaso JM. 2011. Global climate niche estimates for bioenergy crops and invasive species of agronomic origin: potential problems and opportunities. PLoS ONE. 6:e17222.

Byrt CS, Grof CPL, Furbank R.T. 2011. C4 plants as biofuel feedstocks: optimising biomass production and feedstock quality from a lignocellulosic perspective. J Integr Plant Biol. 53:120–135.

Casler MD. 2005. Ecotypic variation among switchgrass populations from the northern USA. Crop Sci. 45:388–398.

Casler MD. 2012. Switchgrass breeding, genetics, and genomics. In: Monti A, editor. Switchgrass: a valuable biomass crop for energy. London: Springer-Verlag.

Casler MD, Vogel KP, Taliaferro CM, Ehlke NJ, Berdahl JD, Brummer EC, Kallenbach RL, West CP, Michell RB. 2007. Latitudinal and longitudinal adaptation of switchgrass populations. Crop Sci. 47:2249–2260.

Edward MWSE, Lewandowski IM, Faaij APC. 2009. The economical and environmental performance of miscanthus and switchgrass production and supply chains in a European setting. Renew Sust Energy Rev. 13:1230–1245.

Elbersen HW, Christian DG, El-Bassem N, Bacher W, Sauerbeck G, Alexopoulou E, Sharma N, Piscioneri I, Visser P, Berg D. 2001. Switchgrass variety choice in Europe. Aspect Appl Biol. 65:21–28.

Haberl H, Erb K-H, Krausmann F, Bondeau A, Lauk C, Müller C, Plutzar C, Steinberger JK. 2011. Global bioenergy potentials from agricultural land in 2050: sensitivity to climate change, diets and yields. Biomass Bioenergy. 35:4753–4769.

Hultquist SJ, Vogel KP, Lee K, Arumuganathan K, Kappler SM. 1996. Chloroplast DNA and nuclear DNA content variations among cultivars of switchgrass, *Panicum virgatum* L. Crop Sci. 36:1049–1052.

Jefferson PR, McCaughey WP. 2012. Switchgrass (*Panicum virgatum* L.) cultivar adaptation biomass production, and cellulose concentration as affected by latitude origin. ISRN Agron. 2012:1–9.

Kryževičienė A, Kadžiulienė Ž, Šarūnaitė L, Dabkevičius Z, Tilvikienė V, Šlepetys J. 2011. Cultivation of *Miscanthus x gigantus* for biofuel and its tolerance of Lithuania's climate. Zemdirbyste-Agriculture. 98: 267–274.

Lemus RW. 2004. Switchgrass as an energy crop: fertilization, cultivar and cutting management [PhD thesis]. Blaksburg: University of Virginia.

Lewandowskia I, Scurlockb JMO, Lindvallc E, Christoud M. 2003. The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe. Biomass Bioenergy. 25:335–361.

McLaughlin SB, Kszos LA. 2005. Development of switchgrass (*Panicum virgatum*) as a bioenergy feedstock in the United States. Biomass Bioenergy. 28:515–535.

Moser LE, Vogel KP. 1995. Switchgrass, Big bluestem and Indian grass. In: Barnes RF, Miller DA, Nelson JC, editors. Forages, Vol. I. An introduction to grassland agriculture. Iowa: Iowa State University.

Navys EV. 2008. Sumedėjusių augalų ištvermingumo zonos Lietuvoje, žiemos pakenkimai ir jų vertinimas [Winter hardiness zones of woody plants in Lithuania, winter damages and its evaluations]. Vilnius: Vilniaus universiteto leidykla.

Parrish DJ, Fike JH. 2005. The biology and agronomy of switchgrass for biofuels. Crit Rev Plant Sci. 24:423–459.

Piscioneri I, Pignatelli V, Palazzo S, Sharma N. 2001. Switchgrass production and establishment in the Southern Italy climatic conditions. Energy Convers Manage. 42:2071–2082.

Robbins MP, Evans G, Valentine J, Donnison IS, Alison GG. 2012. New opportunities for the exploitation of energy crops by thermochemical conversion in Northern Europe and the UK. Prog Energy Combust Sci. 38(2):138–155.

Sharma N, Piscioneri I, Pignatelli V. 2003. An evaluation of biomass yield stability of switchgrass (*Panicum virgatum* L.) cultivars. Energy Convers Manage. 44:2953–2958.

Sanderson MA, Owens V, Keyser P, Elbersen W. 2012. Crop management of switchgrass. In: Monti A, editor. Switchgrass: a valuable biomass crop for energy. London: Springer-Verlag.

Sang T, Zhu W. 2011. China's bioenergy potential. GCB Bioenergy. 3(2):79–90.

Sims REH, Mabee W, Saddler JN, Taylor M. 2010. An overview of second generation biofuel technologies. Bioresource Technol. 101:1570–1580.

Stander W. 1989. Determination of the highest biomass producing plant genera (C_4 grasses) of the world for temperate climates. Assessment study for the commission of European communities. Germany: Munich.

Zeng-Hui L, Hong-Bo S. 2010. Comments: main developments and trends of international energy plants. Renew Sust Energy Rev. 14(1):530–534.

Downloaded by [Lzuu Library] at 09:39 30 October 2014

ISSN 1392-3196 / e-ISSN 2335-8947
Zemdirbyste-Agriculture, vol. 102, No. 2 (2015), p. 153–158
DOI 10.13080/z-a.2015.102.020

Variability of nuclear DNA content and agromorphological characteristics of switchgrass (*Panicum virgatum* L.) germplasm in Lithuania

Giedrė DABKEVIČIENĖ, Nijolė LEMEŽIENĖ, Eglė NORKEVIČIENĖ, Žilvinas LIATUKAS, Jurgita CESEVIČIENĖ, Rita ARMONIENĖ, Bronislava BUTKUTĖ

Institute of Agriculture, Lithuanian Research Centre for Agriculture and Forestry
Instituto 1, Akademija, Kėdainiai distr., Lithuania
E-mail: giedre@lzi.lt

Abstract

While searching for novel energy plants, researchers have become interested in switchgrass (*Panicum virgatum* L.), which is a C4 perennial grass. The objective of this study was to assess switchgrass populations by estimating the variability of nuclear DNA content and agromorphological characteristics.

Plant ploidy level was determined using a flow cytometry technique. The switchgrass collection comprised 31 populations differing in ploidy level. Seventeen populations were tetraploid with an average genomic DNA content of 2.5 picograms (pg). The individuals of 4 populations were found to have an average DNA content of 5.4 pg, which is specific to octoploids. The remaining 10 populations were estimated to be of a mixed ploidy level with DNA content ranging from 2.1 to 7.0 pg. The plants of tetraploid and mixed ploidy populations were characterised by significantly taller culms and more abundant fresh biomass production compared with octoploid populations. An analysis of dry matter revealed a similar trend. Earlier heading date was observed for tetraploid populations. All switchgrass populations tested exhibited a similar overwinter survival rate (93.7–96.7%). The most stable characteristics were found to be plant height, bunch diameter, leaf width and length (coefficient of variation 4.0–9.7%). Among all plant characteristics, the greatest variability was established for dry biomass yield (coefficient of variation 5.0–35.8%).

Key words: agromorphological characteristics, ploidy level, switchgrass, wild populations.

Introduction

Search for and research on energy plants used for biofuel production is currently one of the most rapidly developing alternative energy realms. In Lithuania, intensive efforts have been focused in recent years to identify perennial grasses suitable for conversion into biofuel. Attention has been drawn to switchgrass (*Panicum virgatum* L.), a C4 perennial grass, which is used worldwide, especially in the USA, for combustion and as a feedstock for the second generation bioethanol and biogas production (Black, 1971; Beale, Long, 1995; Fay et al., 2003).

The world switchgrass collection includes commercial varieties, breeding lines and two distinct groups of wild ecotypes – the upland and the lowland, which differ not only in agrobiological and phenotypic characteristics but also in ploidy level (Alexopoulou et al., 2008; Casler, 2010). There is information about agrobiological characteristics of switchgrass varieties, chromosome number in them and their suitability for combustion.

Switchgrass is a perennial grass which can be grown across a wide geographic range. Only ornamental forms of switchgrass are currently grown in Lithuania. Switchgrass is cross-pollinating, highly heterozygous species with multiple ploidy levels ranging from $2n = 2x = 18$ to $2n = 12x = 108$ (Parrish, Fike, 2005; Narasimhamoorthy et al., 2008). Tetraploid ($2n = 4x = 36$) and octoploid ($2n = 8x = 72$) ecotypes are the most common. These two groups of ecotypes differ in both agrobiological and phenological characteristics (Casler, 2012). Some researchers maintain that such division into two separate groups is inaccurate (Missaoui et al., 2006; Zhang et al., 2011 a), because of the existence of the intermediate (hybrid) group of ecotypes for which stable level of ploidy is not inherent (Vogel, Mitchell, 2008; Zhang et al., 2011 b). It is believed that an increase in chromosome number in polyploid plant populations enhances the level of heterozygosity and creates prerequisites for better adaptation of the species, i.e. increases its adaptability across a broad geographic range (Parisod et al., 2010; Delaney, Baack, 2012). For breeding, seed production and maintenance of collections it is essential that the populations of switchgrass of different ploidy level are isolated from one another in order to prevent inter-population crossing (Delaney, Baack, 2012).

A numerous collection of germplasm of switchgrass varieties and wild ecotypes obtained from the Plant Genetic Resources Conservation Unit of the United States Department of Agriculture and Agricultural Research Service has opened up possibilities for identification of the most promising material for cultivation under Lithuania's conditions. The wild switchgrass populations are expected to be an especially highly valuable material, since they are characterised by higher phenotypic and genotypic polymorphism than commercial varieties, which is a valid basis for deeper genetic research and for envisaging future directions in switchgrass breeding. Our study is the first attempt in Lithuania to estimate the genetic switchgrass collection with a focus on the variability of nuclear DNA content and agromorphological characteristics.

Material and methods

Experiments were conducted in the Central Lowland of Lithuania (55°23′49″ N, 23°51′40″ E), at Institute of Agriculture, Lithuanian Research Centre for Agriculture and Forestry during 2012–2013. The investigations were carried out at the Department of Grass Breeding and the Laboratory of Genetics and Physiology. Seeds for the germplasm collections of switchgrass were obtained from Plant Genetic Resources Conservation Unit (PGRCU) of the United States Department of Agriculture and Agricultural Research Service. The collection was composed of wild upland populations originated from North Dakota.

Plant ploidy level was estimated using a flow cytometer (Partec GmbH, Germany) (Lu et al., 1998). The analysis was performed in plant leaf tissue. Based on the manufacturer's instructions, the following regime was selected: gain = 700, L-L = 20, speed = 1. The data from the flow cytrometric analysis were used to estimate plant genome size, i.e. nuclear DNA (deoxyribonucleic acid) content expressed in picograms (pg). The standard used for the comparison was wheat (*Triticum* spp.) with a known nuclear DNA content (2n = 32 pg) (Johnston et al., 1999), which in our study corresponded to the cytometer's peak position at reading 236. The formula used for converting fluorescence values to DNA content was: nuclear DNA content = (mean position of unknown peak)/(mean position of known peak) × DNA content of known standard (Pecinka et al., 2006; Narasimhamoorthy et al., 2008). For ploidy level establishment, DNA content was analysed in 6–8 plants of each population.

The genetic collection of switchgrass under study was set up using the seedlings grown in a greenhouse. At the beginning of June, 28 seedlings per accession (2 replications, 14 × 2) were planted in the field at 50 × 50 cm distances. Average fresh biomass yield per plant (g) for the first and second cuts was determined having weighed all plants per plot of each replication. Dry biomass yield per plant was calculated from the data of fresh herbage mass, dry biomass content and plant number per plot. For dry biomass content, herbage samples of 0.5 kg were oven-dried at 105°C to a constant weight. The first cut was taken at the beginning of heading stage of each accession, the second cut after re-growth of aftermath. The following agromorphological characteristics were determined: overwinter survival rate, %, earliness (heading date), plant height, cm (at booting stage), number of culms (at heading stage), bunch diameter (after the second cut), leaf width and length (at seed ripening stage).

The statistical analysis of the experimental data was done using software *ANOVA*, *STAT* from the package *SELEKCIJA* and *IRRISTAT* (Tarakanovas, Raudonius, 2003).

Results and discussion

Previous studies have reported that the lowland populations are exclusively tetraploid, whereas the upland type can vary in ploidy (tetraploid, heksaploid and octoploid), both within and among populations (Narasimhamoorthy et al., 2008; Costich et al., 2010; Zalapa et al., 2011, Zhang et al., 2011 b; Lu et al., 2013). Our results also showed that switchgrass collection varied in ploidy between populations.

In the plants of many populations (17, i.e. 54.8%), nuclear DNA content averaged 2.5 pg (ranged from 2.1 to 3.3 pg). We clustered these populations into the group of tetraploid (2n = 4x = 36) populations. In the switchgrass individuals of four populations (12.9%), we established the nuclear DNA content on average 5.4 pg (5.0–5.7 pg), which is specific to octoploid (2n = 8x = 72) plants (Table 1).

The remaining 10 tested populations (32.3%) were of mixed ploidy. These populations were composed of different ploidy plants. Analysis of 74 plants showed that 21 individuals were tetraploid, 5 – hexaploid (average DNA content 4.2 pg, from 4.1 to 4.5 pg), 8 – octoploid, 17 – decaploid (average DNA content 6.5 pg, from 5.6 to 7.0 pg). Various nuclear DNA content was determined in 23 remaining plants. DNA content ranged from 2.1 to 7.0 pg. In these samples cytometer showed two peaks corresponding to different ploidy levels.

Lu et al. (1998) and Narasimhamoorthy et al. (2008) have suggested that 2n nuclear DNA content in tetraploid switchgrass plants averages 3.1 pg and in octaploid plants 6.1 pg. Previous studies have reported that DNR content in nucleus of tetraploid plants was 3.1 pg and octoploid – 5.2 pg (Costich et al., 2010; Casler, 2012). Hopkins et al. (1996) indicated that the nuclear DNA content for tetraploid switchgrass plants varied in the range of 2.7 to 3.2 pg (on average 3.1 pg) and that of octoploids ranged from 4.8 to 5.8 pg (on average 5.2 pg).

Our results agree with the findings of other studies. Narasimhamoorthy et al. (2008) are consistent that a large proportion of switchgrass ecotypes growing in Central America territories have mixed ploidy levels. Aneuploidy is observed in the populations with a higher ploidy level, which results in fertility reduction in their progeny and even higher genomic instability (Zhang et al., 2011 b). The diploid set of chromosomes (2n = 2x = 18) in switchgrass populations is very rare (Zhang et al., 2011 b). Successful breeding is only possible when populations of the same ploidy level are hybridised (Hopkins et al., 1996), while crosses between the populations of different ploidy levels typically result in inhibited seed set or production of abnormal seed. Nonetheless, the populations of mixed ploidy are interesting in the studies on the genetic species diversity and evolution.

Table 1. The nuclear DNA content and ploidy level of investigated switchgrass populations

Lithuanian catalogue number	PGRCU catalogue number	Ploidy level	Number of plants per accession	Average DNA content in pg
		Tetraploid populations		
24	PI 642310 01 SD	4x	8	2.4
25	PI 642311 01 SD	4x	8	2.8
26	PI 642312 01 SD	4x	8	2.3
30	PI 642292 01 SD	4x	7	2.1
31	PI 642293 01 SD	4x	8	2.5
33	PI 642291 01 SD	4x	7	2.6
42	PI 642286 01 SD	4x	8	2.3
47	PI 642296 01 SD	4x	8	2.2
50	PI 642299 01 SD	4x	8	2.6
57	PI 642306 01 SD	4x	7	3.2
104	PI 642232 01 SD	4x	8	2.5
105	PI 642233 01 SD	4x	8	2.6
106	PI 642234 01 SD	4x	8	2.1
107	PI 642235 01 SD	4x	8	2.5
127	PI 642259 01 SD	4x	8	3.1
130	PI 642262 01 SD	4x	8	3.3
134	PI 642266 01 SD	4x	8	2.1
		Octoploid populations		
113	PI 642242 01 SD	8x	8	5.6
114	PI 642243 01 SD	8x	7	5.3
119	PI 649249 01 SD	8x	7	5.7
129	PI 642261 01 SD	8x	8	5.0
		Mixed ploidy levels populations		
116	PI 642245 01 SD	4x / 10x / 8x + 4x*	2 / 3 / 2	3.2 / 7.0 / 4.5 + 2.7**
118	PI 642247 01 SD	6x / 8x + 4x	4 / 2	4.5 / 5.1 + 2.1
115	PI 642244 01 SD	4x 10x / 10x + 4x	1 / 6 / 1	2.5 / 7.0 / 5.6 + 2.6
53	PI 642302 01 SD	4x / 10x / 10x + 6x	4 / 1 / 3	3.2 / 6.9 / 6.7 + 3.8
125	PI 642257 01 SD	4x / 10x	7 / 1	3.3 / 6.6
112	PI 642240 01 SD	8x / 10x + 4x	4 / 2	5.7 / 5.8 + 2.7
117	PI 642246 01 SD	10x / 10x + 4x	6 / 1	6.7 / 5.6 + 2.6
124	PI 642256 01 SD	4x / 8x + 4x	2 / 6	3.2 / 4.9 + 2.7
126	PI 642258 01 SD	4x / 6x + 4x	5 / 3	3.2 / 4.5 + 2.6
32	PI 642294 01 SD	6x / 10x + 6x	5 / 3	3.9 / 7.0 + 4.1

Note. PGRCU – Plant Genetic Resources Conservation Unit; * and ** – corresponding ploidy levels and DNA content in plants, with various DNA content in leaf tissues.

Dhooghe et al. (2011) suggest that for the determination of ploidy it is expedient to use a considerably more effective technique – flow cytometry, while the conventional chromosome count method should be employed for the verification of ploidy results. We agree with Hopkins et al. (1996), who maintain that flow cytometry is a suitable technique to distinguish tetraploid individuals from octoploid ones, while in order to identify diploid, hexsaploid and aneuploid individuals it is recommended to apply a direct chromosome count in cytological preparations.

Researchers have expressed rather divergent views regarding the relationship between ploidy level and agromorphological characteristics of switchgrass populations. Casler (2005) has pointed out that analysis of morphological characteristics is an effective tool for discriminating between tetraploid and octoploid populations, whereas Lowry et al. (2014) have stated that many researchers have not discerned the correlation between plant characteristics and ploidy level.

A number of researchers have reported the plants of tetraploid populations to be taller compared to those of octoploid populations (Cortese et al., 2010; Zhang et al., 2011 a).

Our research evidence agrees with this proposition. The plants in our tetraploid and mixoploid populations had significantly ($P < 0.05$) taller culms. Plants in tetraploid populations formed significantly ($P < 0.05$) more stems, compared with octoploid and mixed ploidy plants (Table 2). According to bunch diameter and leaf width, all the three groups of populations were very similar, leaf length of tetraploid plants lagged behind the octoploids and mixed ploidy level plants (on average 3.6 cm shorter).

We established the within-population variation of plant characteristics. Plant height, leaf width and length, bunch diameter parameters varied little or moderately (CV 4.6–11.3%) in all populations. The stems number variation rate was medium (CV 13.1%) in mixed ploidy plants, while in populations of tetraploids and octoploids it was high (CV 20.7–29.9%).

Fresh and dry biomass yield is one of the major indicators of plant productivity (Table 3). The average data of the first cut and annual yield (1st + 2nd cuts)

Table 2. Diversity of agromorphological characteristics in the populations of switchgrass differing in ploidy level

Ploidy level	Plant height cm		Number of culms		Bunch diameter cm		Leaf width cm		Leaf length cm	
	Mean ± SE	CV	Mean ± SE	CV	Mean ± SE	CV	Mean ± SE	CV	Mean ± SE	CV
Tetraploid	115.8 ± 2.4 a*	8.6	72.3 ± 3.6 a	20.7	18.9 ± 0.5	11.3	9.8 ± 0.10	4.6	42.7 ± 1.0 a	9.7
Octoploid	97.3 ± 1.9 b	4.0	64.6 ± 9.7 b	29.9	17.9 ± 1.0	10.8	10.4 ± 0.3	6.4	46.1 ± 2.1 b	9.2
Mixed	107.3 ± 3.3 a	8.7	62.3 ± 2.9 b	13.1	18.9 ± 0.4	6.4	10.1 ± 0.3	7.7	46.5 ± 1.4 b	8.7

Note. SE – standard error, CV – coefficient of variation %; * – values with the same letter are not significantly different ($p < 0.05$).

Table 3. Variation of fresh and dry biomass yield of switchgrass populations differing in ploidy level

Ploidy level	1st cut		2nd cut		1st + 2nd cuts	
	mean ± SE	CV	mean ± SE	CV	mean ± SE	CV
	Fresh biomass yield, g plant^{-1}					
Tetraploid	334.2 ± 16.8 a*	20.9	400.0 ± 17.3 a	17.8	734.3 ± 29.4 a	16.5
Octoploid	187.8 ± 8.7 b	9.2	413.0 ± 17.5 a	8.5	600.8 ± 15.1 b	5.0
Mixed	268.8 ± 15.8 b	16.3	460.2 ± 24.9 b	15.4	729.0 ± 30.0 a	11.8
	Dry biomass yield, g plant^{-1}					
Tetraploid	79.3 ± 4.4 a	22.8	134.9 ± 5.4	16.6	214.2 ± 8.4	16.3
Octoploid	44.3 ± 2.3 b	10.4	160.9 ± 28.3	35.8	205.2 ± 28.2	27.5
Mixed	60.6 ± 3.3 b	15.3	154.1 ± 9.3	17.1	214.7 ± 9.1	12.0

Note. SE – standard error, CV – coefficient of variation %; * – values with the same letter are not significantly different ($p < 0.05$).

showed that tetraploid and mixed ploidy populations accumulated significantly ($P < 0.05$) more fresh biomass compared with octoploid populations. Analysis of the dry biomass yield of the first cut revealed that tetraploid switchgrass populations maintained their superiority over octaploid and mixed ploidy populations, i.e. significantly ($P < 0.05$) outyielded them. Plants of mixed ploidy populations produced the highest ($P < 0.05$) second cut fresh biomass yield. However, the dry biomass yield of the second cut of tetraploid populations fell behind that of octoploid and mixed ploidy populations. According to the annual dry biomass yield (1st + 2nd cuts), tetraploid and mixed ploidy populations were very similar; however, they inappreciably surpassed octaploid plants. The analysis of the first cut of dry biomass yields showed that tetraploid population significantly ($P < 0.05$) surpassed the octoploid and mixed ploidy populations. Slightly higher dry biomass yield was determined in the octoploid and mixed ploidy populations after second cut. There was no significant difference between annual (1st + 2nd cuts) dry biomass yield in tetraploid and mixed ploidy populations and was only slightly higher than in octoploid population. Population catalogue Nos. 106, 57 and 130 were distinguished for the high fresh mass yield. The fresh/dry biomass yield for these populations averaged 824.4/248.0 – 917.2/260.0 (g plant^{-1}).

The coefficient of variation of fresh biomass yield ranged from 11.8% to 20.9% in tetraploid and mixed ploidy populations; while in octoploid plants it shifted slightly – from 5.0% to 9.2%. The lowest stable indication was dry biomass levels. Coefficient of variation of dry biomass yield varied from 10.4% to 35.8% in tetraploid and octoploid populations, while in mixed ploidy populations it varied just from 12.0% to 17.1%. The data provided in Table 4 show that all switchgrass populations were similar in overwinter survival rate.

Table 4. Overwinter survival and heading date of switchgrass

Ploidy level	Average overwinter survival rate %	Earliness			
		heading date	plant %	heading date	plant %
Tetraploid	96.0	30 06–01 07	75.0 a*	08 07	25.0 a
Octoploid	93.7	30 06–01 07	33.3 b	08 07	66.7 b
Mixed	96.7	30 06–01 07	20.0 b	08 07	80.0 b

Note. * – values with the same letter are not significantly different ($p < 0.05$).

According to the weather data from the Dotnuva Agrometeorological Station, the winter of 2012–2013 was adverse for overwinter survival of switchgrass collections. The winter was cold, with a long-lasting snow cover and frozen soil. Notwithstanding this fact, wild switchgrass populations exhibited a good overwinter survival rate averaging 93.7–96.7%. An insignificantly worse overwinter survival rate was recorded for the four tetraploid populations (Nos. 134, 42, 30 and 24) – 89.3%, two octoploid populations (Nos. 114 and 119) – 85.7–89.3% and one mixed ploidy population (No. 118) – 85.7%.

Tetraploid plants were characterized by earliness of maturity in our collection. Seventy five percent of tetraploid plant ears emergence started 7 days earlier than that of octoploid and mixed ploidy populations. Results of

other studies on this issue are controversial. Cortese et al. (2010) have reported tetraploid populations to be of a later maturity compared with octoploid. Lowry et al. (2014) suggest that the phenotypic characteristics (heading, full anthesis, seed maturity dates) of switchgrass populations are largely dependent on the latitude of their origin rather than on ploidy level. We agree with the opinion that that these characteristics are determined by the interaction of various factors (origin, environment).

Conclusions

1. Wild populations of the switchgrass collection differed in ploidy level: tetraploid (genomic DNA content of 2.5 pg), octoploid (genomic DNA content of 5.4 pg) and mixed (genomic DNA content from 2.1 to 7.0 pg).

2. The plants of tetraploid and mixed ploidy populations produced significantly ($P < 0.05$) taller culms. According to leaf length, tetraploid plants lagged behind octoploid and mixed ploidy plants; however, tetraploids tended to form more culms. All the three groups of populations were very similar in terms of bunch diameter and leaf width.

3. Tetraploid and mixed ploidy populations accumulated significantly ($P < 0.05$) more fresh biomass compared with octoploid populations. The same trend was observed for dry biomass yield.

4. The overwinter survival rate for all populations ranged from 93.7% to 96.7%. The plants of tetraploid populations exhibited earlier heading date. The highest variability was recorded for dry biomass yield (coefficient of variation 5.0–35.8%).

Acknowledgements

This research was funded by a grant (No. MIP-073/2012) from the Research Council of Lithuania.

Received 06 08 2014
Accepted 10 04 2015

References

Alexopoulou E., Sharma N., Paptheohari Y., Christou M., Piscioneri I., Panoutsou C., Pignatelli V. 2008. Biomass yields for upland and lowland switchgrass varieties grown in the Mediterranean region. Biomass and Bioenergy, 32 (10): 926–933 http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.01.015

Beale C. V., Long S. P. 1995. Can perennial C4 grasses attain high efficiencies of radiant energy conversion in cool climates? Plant, Cell and Environment, 18: 641–650 http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-3040.1995.tb00565.x

Black C. C. 1971. Ecological implications of dividing plants into groups with distinct photosynthetic production capacities. Cragg J. B. (ed.). Advances in ecological research. New York, USA, p. 87–114

Casler M. D. 2005. Ecotypic variation among switchgrass populations from the northern USA. Crop Science, 45: 388–398 http://dx.doi.org/10.2135/cropsci2005.0388

Casler M. D. 2010. Changes in mean and genetic variance during two cycles of within-family selection in switchgrass. Bioenergy Research, 3: 47–54 http://dx.doi.org/10.1007/s12155-009-9071-9

Casler M. D. 2012. Switchgrass breeding, genetics, and genomics. Monti A. (ed.). Switchgrass: a valuable biomass crop for energy. London, New York, p. 29–53

Cortese L. M., Honig J., Miller Ch., Bonos S. A. 2010. Genetic diversity of twelve switchgrass populations using molecular and morphological markers. Bioenergy Research, 3: 262–271 http://dx.doi.org/10.1007/s12155-010-9078-2

Costich D. E., Friebe B., Sheehan M. J., Casler M. D., Buckler E. S. 2010. Genome-size variation in switchgrass (*Panicum virgatum*): flow cytometry and cytology reveal rampant aneuploidy. The Plant Genome, 3 (3): 130–141 http://dx.doi.org/10.3835/plantgenome2010.04.0010

Delaney J. T., Baack E. J. 2012. Intraspecific chromosome number variation and prairie restoration – a case study in Northeast Iowa, U.S.A. Restoration Ecology, 20 (5): 576–583 http://dx.doi.org/10.1111/j.1526-100X.2011.00825.x

Dhooghe E., Van Laere K., Eeckhaut T., Leus L., Van Huylenbroeck J. 2011. Mitotic chromosome doubling of plant tissues *in vitro*. Plant Cell, Tissue and Organ Culture, 104 (3): 359–373 http://dx.doi.org/10.1007/s11240-010-9786-5

Fay P. A., Carlisle J. D., Knapp A. K., Blair J. M., Collins S. L. 2003. Productivity responses to altered rainfall patterns in a C4-dominated grassland. Oecologia, 137: 245–251 http://dx.doi.org/10.1007/s00442-003-1331-3

Hopkins A. A., Taliafero C. M., Murphy C. D., Christian D. 1996. Chromosome number and nuclear DNA content of several switchgrass populations. Crop Science, 36: 1192–1195 http://dx.doi.org/10.2135/cropsci1996.0011183X003600050021x

Johnston J. S., Bennett M. D., Rayburn A. L., Galbraith D. W., Price H. J. 1999. Reference standards for determination of DNA content of plant nuclei. American Journal of Botany, 86 (5): 609–613 http://dx.doi.org/10.2307/2656569

Lowry D. B., Behrman K. D, Grabowski P., Morris G. P., Kiniry J. R., Juenger T. E. 2014. Adaptations between ecotypes and along environmental gradients in *Panicum virgatum*. The American Naturalist, 183 (5): 682–692 http://dx.doi.org/10.1086/675760

Lu F., Lipka A. E., Glaubitz J., Elshire R., Cherney J. H., Casler M. D., Buckler E. S., Costich D. E. 2013. Switchgrass genomic diversity, ploidy, and evolution: novel insights from a network-based SNP discovery protocol. PLoS Genetics, 9 (1), e1003215 http://dx.doi.org/10.1371/journal.pgen.1003215

Lu K., Kaeppler S. M., Vogel K., Arumuganathan K., Lee D. J. 1998. Nuclear DNA content and chromosome numbers in switchgrass. Great Plains Research, 8: 269–280

Missaoui A. M., Patersin A. H., Bouton J. H. 2006. Molecular markers for the classification of switchgrass (*Panicum virgatum* L.) germplasm and to assessgenetic diversity in threesynthetic switchgrass populations. Genetic Resources and Crop Evolution, 53: 1291–1302 http://dx.doi.org/10.1007/s10722-005-3878-9

Narasimhamoorthy B., Saha M. C., Swaller T., Boruton J. H. 2008. Genetic diversity in switchgrass collections assessed by EST-SSR markers. Bioenergy Research, 1: 136–146 http://dx.doi.org/10.1007/s12155-008-9011-0

Parisod Ch., Holderegger R., Brochmann Ch. 2010. Evolutionary consequences of autopolyploidy. New Phytologist, 186 (1): 5–17 http://dx.doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.03142.x

Parrish D. J., Fike J. H. 2005. The biology and agronomy of switchgrass for biofuels. Critical Reviews in Plant Science, 24 (5–6): 423–459 http://dx.doi.org/10.1080/07352680500316433

Pecinka A., Suchánková P., Lysak M. A., Trávníček B., Doležel J. 2006. Nuclear DNA content variation among Central European *Koeleria* taxa. Annals of Botany, 98 (1): 117–122 http://dx.doi.org/10.1093/aob/mcl077

Tarakanovas P., Raudonius S. 2003. Agronominių tyrimų duomenų statistinė analizė taikant kompiuterines programas *ANOVA*, *STAT*, *SPLIT-PLOT* iš paketo *SELEKCIJA* ir *IRRISTAT*. Lithuanian University of Agriculture, 58 p. (in Lithuanian)

Vogel K. P., Mitchell R. B. 2008. Heterosis in switchgrass: biomass yield in swards. Crop Science, 48: 2159–216 http://dx.doi.org/10.2135/cropsci2008.02.0117

Zalapa J. E., Price D. L., Kaeppler S. M., Tobias C. M., Okada M., Casler M. D. 2011. Hierarchical classification of switchgrass genotypes using SSR and chloroplast sequences: ecotypes, ploidies, gene pools, and cultivars. Theoretical and Applied Genetics, 122 (4): 805–817 http://dx.doi.org/10.1007/s00122-010-1488-1

Zhang Y., Zalapa J. E., Jakubowski A. R., Price D. L., Acharya A., Wei Y., Brummer E. C., Kaeppler S. M., Casler M. D. 2011 (a). Post-glacial evolution of *Panicum virgatum*: centers of diversity and gene pools revealed by SSR markers and cpDNA sequences. Genetica, 139: 933–948 http://dx.doi.org/10.1007/s10709-011-9597-6

Zhang Y., Zalapa J. E., Jakubowski A. R., Price D. L., Acharya A., Wei Y., Brummer E. C., Kaeppler S. M., Casler M. D. 2011 (b). Natural hybrids and gene flow between upland and lowland switchgrass. Crop Science, 51: 2626–2641 http://dx.doi.org/10.2135/cropsci2011.02.0104

ISSN 1392-3196 / e-ISSN 2335-8947
Zemdirbyste-Agriculture, vol. 102, No. 2 (2015), p. 153–158
DOI 10.13080/z-a.2015.102.020

Rykštėtosios soros (*Panicum virgatum* L.) populiacijų DNR kiekio ir agromorfologinių požymių įvairovė Lietuvoje

G. Dabkevičienė, N. Lemežienė, E. Norkevičienė, Ž. Liatukas, J. Cesevičienė, R. Armonienė, B. Butkutė

Lietuvos agrarinių ir miškų mokslų centro Žemdirbystės institutas

Santrauka

Ieškant naujų energinių augalų, susidomėta daugiamečiu C4 fotosintezės tipo augalu – rykštėtąja sora (*Panicum virgatum* L.). Tyrimo tikslas – įvertinti rykštėtosios soros populiacijas, nustatyti DNR (deoksiribonukleorūgšties) kiekio ir agromorfologinių požymių įvairovę.

Augalų ploidiškumas buvo nustatytas taikant tėkmės citometrijos metodą. Rykštėtosios soros kolekciją sudarė 31 įvairaus ploidiškumo populiacija. Iš jų 17 buvo tetraploidinės – vidutiniais duomenimis, genominis DNR kiekis buvo 2,5 pikogramo (pg); 4 populiacijų individuose nustatytas oktoploidams būdingas DNR kiekis – 5,4 pg. Kitų 10 populiacijų ploidiškumas įvairavo – augalų ląstelių branduoliuose DNR kiekis kito nuo 2,1 iki 7,0 pg. Nustatyta, kad esmingai aukštesni stiebai ir didesnis kiekis žalios biomasės būdingesni tetraploidinių bei mišraus ploidiškumo populiacijų augalams nei oktoploidiniams. Panaši tendencija nustatyta analizuojant sausos biomasės kiekį. Tyrimo duomenimis, tetraploidinių populiacijų augalams būdinga ankstesnė plaukėjimo pradžia. Visų rykštėtosios soros populiacijų žiemojimas panašus – 93,7–96,7 %. Stabiliausi požymiai – augalų aukštis, kero skersmuo, lapų plotis ir ilgis (variacijos koeficientas 4,0–9,7 %). Didžiausia požymių įvairovė nustatyta analizuojant sausos biomasės kiekį (variacijos koeficientas 5,0–35,8 %).

Reikšminiai žodžiai: agromorfologiniai požymiai, laukinės populiacijos, ploidiškumas, rykštėtoji sora.

PRIEDAI

APPENDIXES

1 priedas. Tirtųjų rykštinės soros populiacijų sąrašas bei jų ploidiškumas ir geografinė kilmė. Populiacijų numeriai pateikti pagal LAMMC ŽI katalogą.
1 annex. List of the studied switchgrass accessions with indication of their ploidy level and geographic origin. The numbers of accessions are presented according to catalogue of Lithuanian Research Centre for Agriculture and Forestry Institute of agriculture

Populiacijos nr. ***Accession No***	**Populiacijos tipas** ***Population type***	**Ploidiškumas** ***Ploidy level***	**Ekotipas** ***Ecotype***	**Geografinė kilmė** ***Geographic origin***
2	Laukinė populiacija *Wild population*	-	-	Merilandas *Maryland*
3	'Cave-in-Rock'	8x	Aukštumų-žemumų hibridas *Upland-lowland hybrid*	Ilinojus *Illinois*
9	Laukinė populiacija *Wild population*	-	Aukštumų-žemumų hibridas *Upland-lowland hybrid*	Kanzasas *Kansas*
23	Laukinė populiacija *Wild population*	-	Aukštumų *Upland*	Šiaurės Dakota *North Dakota*
24	Laukinė populiacija *Wild population*	4x	Aukštumų *Upland*	Šiaurės Dakota *North Dakota*
25	Laukinė populiacija *Wild population*	4x	Aukštumų *Upland*	Šiaurės Dakota *North Dakota*
26	Laukinė populiacija *Wild population*	4x	Aukštumų *Upland*	Šiaurės Dakota *North Dakota*
27	Laukinė populiacija *Wild population*	4x	Aukštumų *Upland*	Šiaurės Dakota *North Dakota*
29	Laukinė populiacija *Wild population*	-	-	Merilandas *Maryland*
30	Laukinė populiacija *Wild population*	4x	Aukštumų *Upland*	Šiaurės Dakota *North Dakota*
31	Laukinė populiacija *Wild population*	4x	Aukštumų *Upland*	Šiaurės Dakota *North Dakota*
33	Laukinė populiacija *Wild population*	4x	Aukštumų *Upland*	Šiaurės Dakota *North Dakota*
36	'Caddo'	8x	Aukštumų *Upland*	Oklahoma *Oklahoma*
38	Selekcinė medžiaga KY 1625 *Breeding line KY 1625*	8x	Aukštumų-žemumų hibridas *Upland-lowland hybrid*	Vakarų Virdžinija *West Virginia*
42	Laukinė populiacija *Wild population*	4x	Aukštumų *Upland*	Šiaurės Dakota *North Dakota*
46	Laukinė populiacija *Wild population*	4x	Aukštumų *Upland*	Šiaurės Dakota *North Dakota*
47	Laukinė populiacija *Wild population*	4x	Aukštumų *Upland*	Šiaurės Dakota *North Dakota*
48	Laukinė populiacija *Wild population*	4x	Aukštumų *Upland*	Šiaurės Dakota *North Dakota*
50	Laukinė populiacija *Wild population*	4x	Aukštumų *Upland*	Šiaurės Dakota *North Dakota*

Populiacijos nr. ***Accession No***	**Populiacijos tipas** ***Population type***	**Ploidiškumas** ***Ploidy level***	**Ekotipas** ***Ecotype***	**Geografinė kilmė** ***Geographic origin***
51	Laukinė populiacija *Wild population*	4x	Aukštumų *Upland*	Šiaurės Dakota *North Dakota*
52	Laukinė populiacija *Wild population*	Mišraus *Mixed*	Aukštumų *Upland*	Šiaurės Dakota *North Dakota*
53	Laukinė populiacija *Wild population*	Mišraus *Mixed*	Aukštumų *Upland*	Šiaurės Dakota *North Dakota*
55	Laukinė populiacija *Wild population*	4x	Aukštumų *Upland*	Šiaurės Dakota *North Dakota*
57	Laukinė populiacija *Wild population*	4x	Aukštumų *Upland*	Šiaurės Dakota *North Dakota*
59	Laukinė populiacija *Wild population*	4x	Aukštumų *Upland*	Šiaurės Dakota *North Dakota*
60	Laukinė populiacija *Wild population*	4x	Aukštumų *Upland*	Šiaurės Dakota *North Dakota*
61	'Falcon'	8x	Aukštumų *Upland*	Naujoji Meksika *New Mexico*
62	'Summer'	4x	Aukštumų *Upland*	Nebraska *Nebraska*
63	'Pathfinder'	8x	Aukštumų *Upland*	Nebraska / Kanzasas *Nebraska /Kansas*
70	Laukinė populiacija *Wild population*	Mišraus *Mixed*	Aukštumų *Upland*	Šiaurės Dakota *North Dakota*
72	Laukinė populiacija *Wild population*	8x	Aukštumų *Upland*	Šiaurės Dakota *North Dakota*
75	Laukinė populiacija *Wild population*	-	Žemumų Lowland	Teksasas *Texas*
76	'Shawnee'	8x	Aukštumų *Upland*	Nebraska *Nebraska*
77	'Dacotah'	4x	Aukštumų *Upland*	Šiaurės Dakota *North Dakota*
78	'Trailblazer'	8x	Aukštumų *Upland*	Nebraska *Nebraska*
80	Laukinė populiacija *Wild population*	-	Žemumų *Lowland*	Arkanzasas *Arkansas*
82	Selekcinė medžiaga AM-314/MS-155 *Breeding line AM-314/MS-155*	-	-	Arkanzasas *Arkansas*
83	Laukinė populiacija *Wild population*	Mišraus *Mixed*	Aukštumų *Upland*	Šiaurės Dakota *North Dakota*
84	Selekcinė medžiaga TEM-SEC *Breeding line* TEM-SEC	-	Žemumų *Lowland*	Teksasas *Texas*
104	Laukinė populiacija *Wild population*	4x	Aukštumų *Upland*	Šiaurės Dakota *North Dakota*
105	Laukinė populiacija *Wild population*	4x	Aukštumų *Upland*	Šiaurės Dakota *North Dakota*
106	Laukinė populiacija *Wild population*	4x	Aukštumų *Upland*	Šiaurės Dakota *North Dakota*
107	Laukinė populiacija *Wild population*	4x	Aukštumų *Upland*	Šiaurės Dakota *North Dakota*
112	Laukinė populiacija *Wild population*	Mišraus *Mixed*	Aukštumų *Upland*	Šiaurės Dakota *North Dakota*
113	Laukinė populiacija *Wild population*	8x	Aukštumų *Upland*	Šiaurės Dakota *North Dakota*
114	Laukinė populiacija *Wild population*	8x	Aukštumų *Upland*	Šiaurės Dakota *North Dakota*
115	Laukinė populiacija *Wild population*	Mišraus *Mixed*	Aukštumų *Upland*	Šiaurės Dakota *North Dakota*
116	Laukinė populiacija *Wild population*	Mišraus *Mixed*	Aukštumų *Upland*	Šiaurės Dakota *North Dakota*
117	Laukinė populiacija *Wild population*	Mišraus *Mixed*	Aukštumų *Upland*	Šiaurės Dakota *North Dakota*
118	Laukinė populiacija *Wild population*	Mišraus *Mixed*	Aukštumų *Upland*	Šiaurės Dakota *North Dakota*

Populiacijos nr. ***Accession No***	**Populiacijos tipas** ***Population type***	**Ploidiškumas** ***Ploidy level***	**Ekotipas** ***Ecotype***	**Geografinė kilmė** ***Geographic origin***
119	Laukinė populiacija *Wild population*	8x	Aukštumų *Upland*	Šiaurės Dakota *North Dakota*
120	Laukinė populiacija *Wild population*	-	Aukštumų *Upland*	Šiaurės Dakota *North Dakota*
124	Laukinė populiacija Wild population	Mišraus Mixed	Aukštumų Upland	Šiaurės Dakota North Dakota
125	Laukinė populiacija *Wild population*	Mišraus *Mixed*	Aukštumų *Upland*	Šiaurės Dakota *North Dakota*
126	Laukinė populiacija *Wild population*	Mišraus *Mixed*	Aukštumų *Upland*	Šiaurės Dakota *North Dakota*
127	Laukinė populiacija *Wild population*	4x	Aukštumų *Upland*	Šiaurės Dakota *North Dakota*
128	Laukinė populiacija *Wild population*	Mišraus *Mixed*	Aukštumų *Upland*	Šiaurės Dakota *North Dakota*
129	Laukinė populiacija *Wild population*	8x	Aukštumų *Upland*	Šiaurės Dakota *North Dakota*
130	Laukinė populiacija *Wild population*	4x	Aukštumų *Upland*	Šiaurės Dakota *North Dakota*
131	Laukinė populiacija *Wild population*	-	Aukštumų *Upland*	Šiaurės Dakota *North Dakota*
132	Laukinė populiacija *Wild population*	-	Aukštumų *Upland*	Šiaurės Dakota *North Dakota*
133	Laukinė populiacija *Wild population*	-	Aukštumų *Upland*	Šiaurės Dakota *North Dakota*
134	Laukinė populiacija *Wild population*	4x	Aukštumų *Upland*	Šiaurės Dakota *North Dakota*
156	'Grenville'	4x	Aukštumų *Upland*	Naujoji Meksika *New Mexico*
157	'Alamo'	4x	Žemumų *Lowland*	Teksasas *Texas*
161	'Kanlow'	4x	Žemumų *Lowland*	Oklahoma *Oklahoma*
162	'Sunburst'	8x	Aukštumų *Upland*	Pietų Dakota *South Dakota*
164	'Southlow'	-	Aukštumų *Upland*	Mičiganas *Michigan*
165	'Blackwell'	8x	Aukštumų *Upland*	Oklahoma *Oklahoma*
166	'Nebraska 28'	8x	Aukštumų *Upland*	Nebraska *Nebraska*
167	'Blackwell'	8x	Aukštumų *Upland*	Oklahoma *Oklahoma*
168	Laukinė populiacija *Wild population*	-	Aukštumų *Upland*	Niujorkas *State of New York*
169	'Forestburg' komercinės sėklos *commercial seeds*	8x	Aukštumų *Upland*	Pietų Dakota *South Dakota*
170	'Cave-in-Rock' komercinės sėklos *commercial seeds*	8x	Aukštumų-žemumų hibridas *Upland-lowland hybrid*	Ilinojus *Illinois*
171	'Dacotah' komercinės sėklos *commercial seeds*	4x	Aukštumų *Upland*	Šiaurės Dakota *North Dakota*
Iš viso veislių *Total cultivars* :				19
Iš viso selekcinių linijų *Total breeding lines:*				3
Iš viso laukinių populiacijų *Total wild populations*				54
Iš viso populiacijų I ir II kolekcijoje *Total populations in I and II collection*				76

- Duomenų nėra *No data available*

2 priedas. Dispersinės analizės rezultatai: metų ir pjūties laiko bei jų sąveikos esmingumas organinių junginių, pelenų ir mineralinių elementų koncentracijoms rykštinės soros biomasėje
2 annex. The summary of the analysis of variance: the effect of year and harvest time treatments on switchgrass biomass quality variables

Rodiklis *Constituent*	**Veiksniai *Factors***	***df***	***MS***	***F***	***p***
C	Metai *Year*	1	57,67	16,38**	0,001
	Pjūties laikas *Harvest time*	3	230,92	65,58**	0,001
	Metai x Pjūties laikas *Year x Harvest time*	3	34,47	9,79**	0,001
N	Metai *Year*	1	0,04	8,52**	0,001
	Pjūties laikas *Harvest time*	3	0,31	54,97**	0,001
	Metai x Pjūties laikas *Year x Harvest time*	3	0,02	3,94*	0,022
C:N	Metai *Year*	1	323,40	7,39*	0,012
	Pjūties laikas *Harvest time*	3	2064,35	47,19**	0,001
	Metai x Pjūties laikas *Year x Harvest time*	3	45,92	1,05	0,391
Klasono ligninas *Klason lignin*	Metai *Year*	1	49,61	0,16	0,695
	Pjūties laikas *Harvest time*	5	6851,41	21,55**	0,001
	Metai x Pjūties laikas *Year x Harvest time*	5	865,26	2,72*	0,036
NDF	Metai *Year*	1	228,44	0,4	0,536
	Pjūties laikas *Harvest time*	3	9704,25	16,79**	0,001
	Metai x Pjūties laikas *Year x Harvest time*	3	1178,71	2,04	0,139
ADF	Metai *Year*	1	22599,38	59,55**	0,001
	Pjūties laikas *Harvest time*	3	9895,14	26,07**	0,001
	Metai x Pjūties laikas *Year x Harvest time*	3	36,84	0,1	0,960
ADL	Metai *Year*	1	191,59	3,72	0,067
	Pjūties laikas *Harvest time*	3	1193,12	23,19**	0,001
	Metai x Pjūties laikas *Year x Harvest time*	3	45,82	0,89	0,462
Celiulioze *Cellulose*	Metai *Year*	1	18629,32	84,82**	0,001
	Pjūties laikas *Harvest time*	3	4385,86	19,97**	0,001
	Metai x Pjūties laikas *Year x Harvest time*	3	40,96	0,19	0,904
Hemiceliuliozė *Hemicellulose*	Metai *Year*	1	18283,50	62,64**	0,001
	Pjūties laikas *Harvest time*	3	1798,15	6,16**	0,003
	Metai x Pjūties laikas *Year x Harvest time*	3	852,21	2,92	0,057

Rodiklis *Constituent*	**Veiksniai *Factors***	***df***	***MS***	***F***	***p***
VTA WSC	Metai *Year*	1	24,65	28,73**	0,001
	Pjūties laikas *Harvest time*	3	20,76	24,2**	0,001
	Metai x Pjūties laikas *Year x Harvest time*	3	0,87	1,02	0,404
Pelenai Ash	Metai *Year*	1	460,69	6,80*	0,013
	Pjūties laikas *Harvest time*	2	1282,49	18,94**	0,001
	Metai x Pjūties laikas *Year x Harvest time*	2	350,16	5,17*	0,010
K	Metai *Year*	1	3,52	5,22*	0,028
	Pjūties laikas *Harvest time*	2	83,65	124,21**	0,001
	Metai x Pjūties laikas *Year x Harvest time*	2	3,12	4,64*	0,016
Na	Metai *Year*	1	0,12	48,72**	0,001
	Pjūties laikas *Harvest time*	2	0,16	38,67**	0,001
	Metai x Pjūties laikas *Year x Harvest time*	2	0,06	19,00**	0,001
Ca	Metai *Year*	1	18,32	8,49**	0,006
	Pjūties laikas *Harvest time*	2	12,01	5,56**	0,008
	Metai x Pjūties laikas *Year x Harvest time*	2	7,14	3,31*	0,048
Mg	Metai *Year*	1	2,53	18,95**	0,001
	Pjūties laikas *Harvest time*	2	5,57	41,67**	0,001
	Metai x Pjūties laikas *Year x Harvest time*	2	0,70	5,29**	0,010
P	Metai *Year*	1	0,02	0,55	0,463
	Pjūties laikas *Harvest time*	2	1,50	40,25**	0,001
	Metai x Pjūties laikas *Year x Harvest time*	2	0,23	6,36**	0,004
Si	Metai *Year*	1	4,35	12,65**	0,001
	Pjūties laikas *Harvest time*	2	0,69	2,02	0,153
	Metai x Pjūties laikas *Year x Harvest time*	2	1,36	3,96*	0,032
Cl	Metai *Year*	1	2,30	21,16**	0,001
	Pjūties laikas *Harvest time*	2	12,82	117,98**	0,001
	Metai x Pjūties laikas *Year x Harvest time*	2	0,03	0,32	0,722
S	Metai *Year*	1	0,11	9,74**	0,003
	Pjūties laikas *Harvest time*	2	0,05	4,66*	0,015
	Metai x Pjūties laikas *Year x Harvest time*	2	0,07	6,04**	0,005

* esminis kai 0,05 > p > 0,01; ** 0,01 > p > 0,001 / * *significant at 0,05 > p > 0,01; ** 0,01 > p > 0,001*