

Paprastosios pušies (*Pinus Sylvestris* L.) sėjinukų populiacinės priklausomybės identifikavimas naudojant hiperspektrinį skenavimą

Vytautė Juodkienė,

Darius Danusevičius,

Gintautas Mozgeris

*Aleksandro Stulginskio universitetas,
Studentų g. 11,
LT-53361 Akademija, Kauno r.
El. paštas: vytaute.juodkiene@asu.lt;
darius.danusevicius@asu.lt;
gintautas.mozgeris@asu.lt*

Genetinė įvairovė yra reikšmingas biologinės įvairovės komponentas, todėl svarbu ieškoti efektyvių sprendimų, kurie padidintų genetinės įvairovės įvertinimo metodų efektyvumą. Straipsnyje pristatomas tyrimas, kuriuo siekiama iš laboratorijoje hiperspektrinio skenavimo būdu išgautų paprastosios pušies sėjinukų spektrinių duomenų atskirti jų populiacinę kilmę. Hiperspektrinis skenavimas – tai šiuo metu pažangiausias atspindėtos elektromagnetinės spinduliuotės informacijos kaupimo ir apdorojimo būdas, apjungiantis nuotrauką ir spektroskopiją. Tyrimams pasirinktos keturios tolimos paprastosios pušies populiacijos – Lietuvos, Rusijos, Ispanijos ir Suomijos. Laboratorinėmis sąlygomis kontaineriuose išauginti šių populiacijų vienamečiai sėjinukai buvo skenuoti hiperspektrine kamera su jautriu įmontuotu spektroskopu, išskaidančiu patenkančią elektromagnetinę spinduliuotę į 955 spektro juostas 400–1 000 nm intervale. Skirtingų populiacijų sėjinukai pasižymi skirtingu artimosios infraraudonosios spinduliuotės atspindžio intensyvumu (750–955 nm). Tuo tarpu regimojoje spektro zonoje (400–700 nm) jų spektrinės savybės buvo panašios. Pagrindinių komponentų analize (PCA) nustatyta, kad populiacijų sėjinukų atskiriamumui naudotinos penkios spektro juostos, kuriose sukaupta reikšmingos informacijos 700–720 nm intervale. Nustatyta, kad paprastosios pušies populiacijas pagal sėjinukų spektrinius duomenis galima patikimai (85,2 %) išskirti. Geriausiai tarpusavyje atsiskiria geografiškai labiausiai nutolusios Ispanijos ir Suomijos populiacijos. Gauti rezultatai leidžia daryti prielaidas apie medžių genetinių savybių nustatymo potencialą nuotoliniu būdu naudojant orlaiviuose įmontuotus hiperspektrinius skenerius.

Raktažodžiai: genetinė įvairovė, spektrinės savybės, klasifikavimo tikslumas

ĮVADAS

Tyrimai, kuriais siekiama didinti miško medžių genetinę įvairovę, yra labai svarbūs dėl unikalaus biologinio miško medžių pobūdžio ir taip pat dėl socialinės ir ekonominės miško svarbos (Timothy, 2007). Genetinė įvairovė apibūdina genetinį kintamumą tarp populiacijų ir jų viduje, yra svarbus biologinės įvairovės komponentas (White et al., 2007). Šiltėjant klimatui ir didėjant aplinkos stresorių poveikiui miškams, ypač svarbus tapo

genetinės įvairovės monitoringas, reikalaujantis efektyvių jos nustatymo metodų (Schwartz et al., 2006). Paprastai genetinė įvairovė nustatoma pagal adaptacinius požymius ar molekulinis žymenis (White et al., 2007). Tačiau šie metodai yra sudėtingi, brangūs, reikalaujantys daug laiko. Naudojami morfologiniai žymenys yra negausūs, juos stipriai veikia aplinkos sąlygos ir nuturi įtakos raidos stadija (Danusevičius, Gabrilavičius, 2003). Šiuo metu žinoma apie keturiasdešimt DNR žymenų tipų, iš kurių vieni gana panašūs,

o kiti labai skiriasi. Įvairios ir jų praktinio pritaikymo galimybės. Kiekvienais metais sukuriama naujos technologijos, kurios keičia senąsias, todėl vienus DNR žymenų nustatymo metodus keičia kiti. Ieškoma alternatyvių sprendimų, kurie įgalintų miško genetinę įvairovę nustatyti patikimiau, pigiau, greičiau, dideliuose plotuose ar pan.

Technologijoms nuolat tobulėjant sukuriama nauji sprendimai, siekiant sumažinti medžių ir miškų savybių nustatymo lauko ir laboratorinių darbų apimtį, atskleisti tai, kas plika akimi nematoma. Nuo įvairių medžių rūšių lapijos ir šakų atspindėta šviesa pasižymi nevienodomis spektrinėmis savybėmis, t. y. skirtingai atspindi, sugeria ir išspinduliuoja elektromagnetinę spinduliuotę (Clark et al., 2005; Vaiphasa et al., 2005; Manevski et al., 2011; Masaitis, Mozgeris, 2012; Ghiyamat et al., 2013; Masaitis ir kt., 2013). Šie subtilūs spektrinių savybių skirtumai gali būti fiksuojami nuotoliniu būdu naudojant įvairias technologijas, spektrometrus ar spektrografus, montuojamus skraidančiuose aparatuose. Hiperspektrinių jutiklių spartus tobulėjimas bei specializuotos hiperspektrinių vaizdų apdorojimo programinės įrangos atsiradimas yra laikomi vienu iš reikšmingiausių proveržių, pastaruoju metu įvykusių nuotolinių tyrimų srityje. Hiperspektrinis skenavimas – tai šiuo metu pažangiausias atspindėtos elektromagnetinės spinduliuotės informacijos kaupimo ir apdorojimo būdas (Im, Jensen, 2008; Eismann, 2012). Hiperspektrinio skenavimo technologija grindžiama šviesos išskaidymu į labai platų elektromagnetinių bangų diapazoną. Fiksuojami keli šimtai labai siaurų elektromagnetinio spektro juostų (<1 nm). Priklausomai nuo konstrukcijos, hiperspektriniai skeneriai gali registruoti informaciją pradedant ultravioletine spektro dalimi (bangų ilgis nuo 200 nm) ir baigiant ilgabange infraraudonąja spektro dalimi (bangų ilgis iki 15 μm) (Im, Jensen, 2008; Eismann, 2012).

Hiperspektrinio skenavimo technologija paprastai yra siejama su nuotoliniais tyrimais. Miškininkystėje hiperspektrinis skenavimas naudojamas medžių rūšims nustatyti, medynų ir miško struktūrai bei būklei tirti, augmenijos produktyvumui, gyvybingumui ir jo pokyčiams įvertinti (Smith et al., 2001a; 2004; Baldocchi et al., 2002; 2003; 2006; O'Neill et al., 2002; Gong et al., 2003; Campbell et al., 2004; Chang et al., 2004; Im,

Jensen, 2008; Mitri, Gitas, 2010; Manevski et al., 2011; Masaitis, Mozgeris, 2012; Masaitis ir kt., 2013).

Lietuvoje hiperspektrinio skenavimo galimybės įvairioms miškotyros problemoms spręsti pradėjo nagrinėti G. Masaitis ir G. Mozgeris (2012). Dėmesys pirmiausiai buvo koncentruojamas į medžių rūšių išskyrimo klausimus nagrinėjant augalijos spektrines savybes bei hiperspektrinius vaizdus. Pavyzdžiui, G. Mozgeris ir kt. (2016), Kauno mieste naudodami hiperspektrinius vaizdus, išskyrė šešias miesto medžių rūšis, kur bendras diskriminantinės analizės klasifikavimo tikslumas siekė 63,1 %. Pagrindinių miško medžių rūšys paprastai yra klasifikuojamos itin tiksliai (>80 %) (Van Aardt et al., 2008; Masaitis, 2013; Danusevicius ir kt., 2014). D. Danusevičius ir kt. (2014), tirdami spyglių spektrines savybes, diskriminantinės analizės būdu suklasifikavo keturias paprastosios pušies kilmės (Archangelskas (šiaur.), Udmurtija, Mažeikiai, Rovnas (piet.)), pasiekdami 94 % bendrą klasifikavimo tikslumą. G. Masaitis disertacijoje išsamiai aptarė skirtingos defoliacijos pušies spyglių, cheminių savybių ryšį su jų spektrinėmis savybėmis, sudarė pagrindinių Lietuvos miško medžių rūšių spektrinių kreivių bibliotekas (Masaitis, 2013). Pastarajame darbe taip pat nagrinėtos skirtingos genetinės kilmės paprastosios pušies medžių spyglių mėginių spektrinių savybių raida vegetacijos sezono metu.

Šiame tyrime siekiame toliau tęsti Aleksandro Stulginskio universiteto (ASU) mokslininkų pradėtus tyrimus, kuriuose nagrinėjamos paprastosios pušies genetinės kilmės nustatymo hiperspektrinio skenavimo metodu galimybės. Kitaip nei G. Masaičio (2013) tyrimuose, čia yra skenuojami ir analizuojami paprastosios pušies sėjinukai, išauginti konteineriuose. Skenuodami sėjinukus bet ne spyglių mėginius, tiriame situaciją, kuri yra maksimaliai priartinta prie nuotolinio hiperspektrinio skenavimo kaip vienos iš nuotolinių tyrimų technologijų. Konteineriuose išauginti sėjinukai yra traktuotini kaip miško maketas, o skenavimo procedūra imituoja informacijos surinkimą iš orlaiviuose įmontuotos platformos. Tyrimo tikslas – pagal laboratorijoje hiperspektrinio skenavimo būdu išgautus paprastosios pušies sėjinukų spektrinius duomenis nustatyti jų genetinę kilmę ir patobulinti spektrinių duomenų apdorojimo metodinius sprendimus.

TYRIMŲ METODAI IR SĄLYGOS

Tyrimai, kuriais siekta nustatyti paprastosios pušies sėjinukų populiacijas hiperspektriniu skenavimu, vykdyti tokia tvarka:

I. Mėginių skenavimas

1. Mėginių paruošimas. Tyrimui pasirinktos keturios paprastosios pušies populiacijos: Lietuvos (Kazlų Rūda 54°45'Š, 23°29'R), Rusijos (Sverdlovskas 58°48'Š, 61°51'R 1828 m virš jūros lygio), Ispanijos (Valsainas, Madrido r. 40°49'Š, 3°57'R) ir Suomijos (Suomussalmi 65°11'Š, 28°53'R). Šių populiacijų sėklos pasėtos 2014 m. gegužės mėn. į HIKO70 tipo 40 vietų konteinerius, po 10 kiekvienos iš keturių populiacijų sėjinukų viename konteineryje. Populiacijų sėjinukai išauginti lauko sąlygomis konteineriuose ir pernešti tyrimui į klimatinę kamerą 2014 m. rugsėjo 3 d., kur buvo grūdinami +5 °C temperatūroje iki 2014 m. lapkričio 25 d., vėliau laikyti natūralioje +17 °C aplinkos temperatūroje iki sėjinuko skenavimo 1 lentelėje nurodytomis datomis. Dėl šilumos poveikio, priklausomai nuo populiacijų, skenavimo metu sėjinukai buvo skirtingo meristemino aktyvumo. Toliau analizuoti tik tie sėjinukai, kurie nežuvo ar nebuvo pažeisti tris kartus skenuojant (1 lentelė). Skenuota sausio 16, vasario 5 ir kovo 2 d. Tai 103 dienos po sėjinukų sudygimo.

2. Hiperspektrinio skenerio parengimo darbai:

2.1. hiperspektrinio skenerio montavimas, skenavimo aukščio parinkimas, halogeninių lempų suderinimas. Laboratorijoje hiperspek-

triniams vaizdams išgauti buvo skenuota JAV kompanijos Themis Vision Systems LLC hiperspektriniu skeneriu „VNIR400H“ (Masaitis, 2013). Itin jautrus šiame skeneryje įmontuotas spektroskopas išskaido į jį patenkančią elektromagnetinę spinduliuotę į 955 spektro juostas 400–1000 nm intervale. Elektromagnetinės spinduliuotės šaltinis – dvi po 100 W halogeninės lempos, orientuotos taip, kad jų sklaidžiama šviesa nekristų tiesiai į objektą. Šviesos srautų kritimo kampas buvo nustatomas apie 30 laipsnių taip, kad kryžiuotųsi ties objektu;

2.2. skenavimo projekto parengimas: darbi- nių katalogų duomenims saugoti sukūrimas, skenavimo parametrų parinkimas. Sudaroma skenuotų sėjinukų duomenų bazė, kurioje su- kuriami du darbiniai katalogai, talpinantys hi- perspektrinio skenavimo ir kalibravimo plokš- tės skenavimų duomenis;

2.3. hiperspektrinio skenerio optinis sistemos fokusavimas. Objektyvo diafragmos nustatymo vertė parinkta 4,0, ekrane išgaunamas kontras- tingų vertikalių linijų vaizdas;

2.4. kalibravimo plokštės skenavimas. Kiekvie- no skenavimo seanso metu buvo nuskenuota kalibravimo plokštė. Tai daryta taip pat kiek- vieną kartą, kai pakeičiami objektyvo (fokusa- vimas, diafragma) ar paties skenerio (eksposi- cijos trukmė, fiksuojamų vaizdo linijų skaičius, aukštis virš objekto ir pan.) nustatymai;

2.5. mėginių skenavimas. Sėjinukų konteineriai buvo dedami ant specialaus skenavimo stalo, prie kurio stovo yra pritvirtintas hiperspektri- nis skeneris (80 cm atstumu virš skenuojamojo

1 lentelė. Nuskenuotų paprastosios pušies populiacijų sėjinukų skaičius pagal skenavimo datas, rodančias sėjinukų meristeminių aktyvumą, priklausomai nuo dienų skaičiaus +17 °C temperatūroje

Table 1. The number of scanned seedlings of the Scots pine populations according to the scanning dates, showing the seedling's meristematic activity, depending on the number of days at +17 °C

Populiacija Population	Skenavimo data / Scanning date		
	57 d. + 17 °C poveikis 57 days of +17 °C treatment (2016 01 16)	78 d. + 17 °C poveikis 78 days of +17 °C treatment (2015 02 05)	103 d. + 17 °C poveikis 103 days of +17 °C treatment (2015 03 02)
Lietuvos / Lithuanian	64	64	64
Rusijos / Russian	86	86	86
Ispanijos / Spanish	65	65	65
Suomijos / Finnish	65	65	65
Iš viso vnt. Total	280	280	280

konteinerio). Laboratorijoje buvo eliminuota visa pašalinė šviesa, patalpa visiškai užtemdyta, o patalpos sienos padengtos juoda medžiaga. Kiekvieno konteinerio skenavimas buvo kartojamas du kartus pasukant konteinerį 90 laipsnių kampu. Visa skenavimo sistemos paruošimo darbai ir skenerio valdymo instrukcija su iliustracijomis pateikiama G. Masaičio disertacijoje (2013);

2.6. tamsiosios fazės vaizdo fiksavimas. Tai atliekama kiekvieno skenavimo seanso pabaigoje, skenuojant uždaryta skenerio optine sistema.

II. Hiperspektrinis vaizdų pradinis apdorojimas

1. Hiperspektrinio vaizdo gardelių absoliutinio ryškumo skaitinių reikšmių perskaičiavimas į santykinio atspindžio reikšmes. Tai daroma skenuoto tiriamojo objekto hiperspektrinio vaizdo gardelių duomenis lyginant su etaloninio balto paviršiaus hiperspektrinio vaizdo gardelių duomenimis. Etaloninis baltas paviršius – kalibravimo plokštė (angl. *Avian Technologies LLC 99% white reference panel*), atspindinti 99 % krintančios spindulių.

2. Triukšmo pašalinimas naudojant Savitzky-Golay (Savitzky, Golay, 1964) filtravimo algoritmą. Themis HyperVisual programine įranga buvo atliekamas skenerio elektroninių komponentų sukulto triukšmo pašalinimas panaudojant spektro kreivę glotninant antros eilės polinomu, naudojant 25 gardelių branduolį.

III. Spektrinių kreivių išgavimas

1. Sėjinuką atitinkančių vaizdo gardelių pažymėjimas nurodant dominančią sritį (angl. *Region of Interest – ROI*). Tai atliekama ENVI 5.1. programine įranga, iš glotniausio hiperspektrinio kalibravimo vaizdo parinktos kalibravimo ROI dominančios sritys sveikų sėjinukų skirtingoms populiacijoms. Dominanti sritis yra daugiakampis, kuris suformuojamas pagal vartotojo nurodytą vaizdo gardelių imtį bei atskiria sėjinuko spyglius nuo kitų vaizde esančių objektų. Dominančios srities parinkimas yra vartotojo kontroliuojamas procesas, t. y. jos išskyrimo kokybė kontroliuota vizualiai.

2. Fono vaizdo (t. y. ne sėjinukus atitinkančių gardelių) pašalinimas.

3. Spektrinių kreivių sukūrimas:

3.1. kiekvieną genetinę kilmę atitinkančių dominančių sričių gardelių santykinio atspindžio

reikšmių vidurkio ir standartinio nuokrypio skaičiavimas visose spektro juostose;

3.2. spektrinių kreivių duomenų išsaugojimas ASCII ir MS Excel formatu.

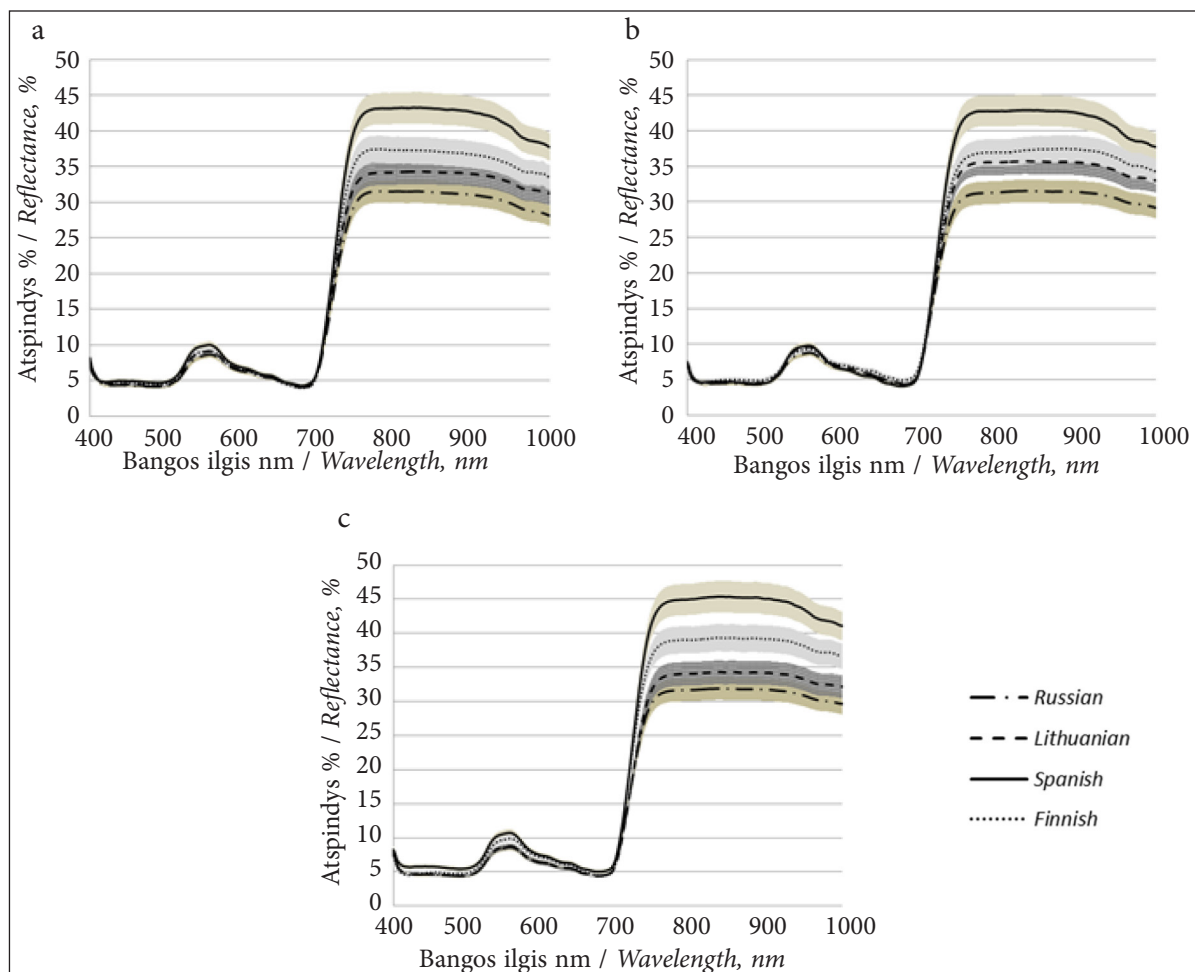
Spektrinių požymių atrinkimo metodai

Siekiant sumažinti spektrinių duomenų masyvą, t. y. atrinkti tik tas spektro juostas, kurios geriausiai išreiškia skirtumus tarp tiriamų populiacijų, buvo naudota Unscrambler X 10.4.1 programinė įranga. Pasitelkta pagrindinių komponentų analizė (PCA) nustatant kiekvienos spektro juostos skaitinių reikšmių svorį pagrindinėms komponentėms (Wold, 1966). Spektrinių juostų skaitinės reikšmės traktuotos kaip nepriklausomi kintamieji, jų reikšmės vykstant PCA buvo standartizuotos, t. y. perskaičiuotos taip, kad jų dispersijos būtų lygios vienetai, o bendroji dispersijų suma sutaptų su kintamųjų skaičiumi. PCA skaičiavimams naudotas specialiai didelių dimensijų spektriniais duomenimis apdoroti sukurtas NIPALS algoritmas (Wold et al., 1987). Toliau diskriminantinės analizės metodu (programinės įrangos SPSS 22 versija) panaudojant informatyviausias spektro juostas bei atsižvelgiant į pušies sėjinukų trukmės testą sėjinukai buvo klasifikuojami į keturias skirtingas pušies populiacijas (Lietuvos, Rusijos, Suomijos, Ispanijos) atitinkančias grupes.

Bendras klasifikavimo tikslumas buvo vertinamas apskaičiuojant teisingai suklasifikuotų sėjinukų dalį nuo viso skaičiaus. Taip pat apskaičiuotas „vykdytojo“ ir „vartotojo“ tikslumas bei \hat{k} statistika (Landis, Koch, 1977).

TYRIMŲ REZULTATAI IR JŲ APTARIMAS

Tirtų objektų spektrinėse kreivėse (pav.) yra išvelgiami bendrieji žaliosios augmenijos spektro bruožai: mažos atspindžio reikšmės mėlynojoje spektro dalyje (iki 495 nm), atspindžio reikšmių augimas ir pikas žaliojoje spektro dalyje (520–560 nm), atspindžio reikšmių mažėjimas geltonojoje–raudonojoje (570–700 nm) spektro zonoje ir minimumas chlorofilo absorbcijos zonoje (650–680 nm), toliau eina staigus atspindžio reikšmių augimas raudonojoje riboje (680–750 nm) ir didelės atspindžio reikšmės artimojoje infraraudonojoje spektro dalyje (750–1 000 nm). Šie dėsningumai atitinka nuotolinių tyrimų literatūroje skelbiamus duomenis (Cochrane, 2000; Im, Jensen, 2008).



Pav. Paprastosios pušies skirtingų populiacijų spektrinės kreivės ir standartiniai nuokrypiai (šešėlinis plotas) atskirais tyrimo atvejais: a) 2015 01 16, b) 2015 02 05, c) 2015 03 02

Figure. Hyperspectral reflectance curves of different Scots pine populations and standard deviation (the shaded area) labelled according to the date of the growing season: a) 16.01.2015, b) 05.02.2015, c) 02.03.2015

Be to, visų stebėjimų metu sėjinukų kreivės pasižymėjo tik jiems būdinga „laiptiška“ spektro kreivių forma geltonojoje–raudonojoje spektro dalyje, būdingu atspindžio reikšmių kritimu ~900–970 nm ir stabilizavimusi arba nežymiu kilimu ~980–1 000 nm artimosios infraraudonosios spektro zonos intervaluose. Skirtingos populiacijų sėjinukai pasižymi skirtingu artimosios infraraudonosios spinduliuotės atspindžio intensyvumu. Mūsų tyrimo duomenimis, spektrinis atspindys buvo didesnis Ispanijos ir mažesnis Rusijos kilmių (710–750 nm) spinduliuotės diapazone. Tuo tarpu regimojoje spektro zonoje (400–700 nm) išliko panašios. Intensyvaus augimo stadijoje sėjinukų, kilusių iš šiltesnio klimato rajonų, spygliuose chlorofilo koncentracija yra didesnė, palyginti su sėjinukais, kilusiais iš šaltesnio klimato rajonų (Masaitis, 2013). Tikėti-

na, kad tai dėl konkurencijos su sparčiai augančia augmenija susiformavusių adaptacinių greito augimo savybių. Tai netiesiogiai patvirtina mūsų tyrimo rezultatai, rodantys, kad intensyvaus augimo laikotarpiu sėjinukų, kilusių iš pietinių klimato rajonų, atspindžio procentinės reikšmės yra didesnės 710–750 nm chlorofilo koncentracijos nustatymo ruože (2 pav.). Dėl trumpų dienų ir šalčio poveikio chlorofilo koncentracija spygliuose greitai mažėja, prasideda intensyvus lignino kaupimas ląstelių sienelėse (Asner, Martin, 2008), dėl kurio ląstelių sienelės storėja ir mažėja jų citoplazma (Danusevičius ir kt., 2014).

Viena iš esminių priežasčių, ribojančių hiperspektrinių vaizdų naudojimą, yra tai, kad skirtingose spektro juostose sukaupti duomenys stipriai koreliuoja tarpusavyje. Siekdami eliminuoti šios tarpusavio koreliacijos įtaką klasifikavimo

procedūroms, atlikome spektrinių duomenų transformaciją. Pagrindinių komponentių analize (PCA) nustatyta, kad penkiose komponentėse po transformacijos buvo sukaupiama 95 % visos 995 spektro juostų informacijos. Šios juostos ir buvo tinkamiausios (informatyviausios) skirtumams tarp paprastosios pušies populiacijoms aptikti.

Pagrindinių komponentių paaiškinta spektrinių duomenų dispersijos dalis ir spektro juostos, geriausiai išreiškiančios skirtumus tarp genetinės kilmės sėjinukų spektrų, pateikiamos 2 lentelėje.

Informatyviausios juostos buvo skirtingos atskirais skenavimo momentais. Sausio ir vasario mėn. skenavimo metu klimatinėje kameroje paprastosios pušies populiacijų sėjinukų ūgliai intensyviai augo, didžiausią reikšmę turėjo raudonosios ir artimosios infraraudonosios elektromagnetinio spektro zonų juostos. Kovo mėn., pasibaigus ūglių augimui, informatyviausios juostos tarsi išsiskyrė į priešingas spektro zonas – trumpųjų bangų zoną (violetinę) ir ilgųjų bangų zoną (raudonąją-artimąją). Mūsų gautus duomenis patvirtina L. Sundblad ir kt. (2001) tyrimas, kuriame ištirtas regimosios ir infraraudonosios spektro dalių tinkamumas nustatant daigynuose auginamų jaunų paprastosios pušies

sodmenų užsigrūdinimą. Pagal regimojo spektro komponentes ties 680 nm patikimai nustatomas lignino ir chlorofilo kiekių santykis, pagal ilgesnes infraraudonosios spektro dalies bangas – lignino, vandens, angliavandenių ir celiuliozės kiekis (Danusevičius ir kt., 2014; Aaron Ball et al., 2015). Akivaizdu, kad spektrinis atspindys 710–750 nm bangų zonoje atspindi fiziologinį slenktį, kuris yra svarbus klasifikuojant pagal kilmės, kadangi kaip tik šioje zonoje labiausiai kinta genetinės kilmės efektas. Nustatyta, kad (išskyrus kovo 2 d.) sėjinukų pasiskirstymą intensyvaus augimo stadijoje geriausiai parodo bangų ilgiai, atitinkantys optimalų spektro intervalą chlorofilo kiekiui nustatyti (700–750 nm, 2 lentelė).

Paprastosios pušies sėjinukų genetinės kilmės atskiriamumas jų spektrinių duomenų pagrindu vertintas pagal klasifikavimo, naudojant Fišerio diskriminantinę analizę, tikslumą. Kaip diskriminavimo kintamieji naudotos genetinės kilmės skirtumams jautriausių atrinktų spektro juostų (2 lentelė) skaitinės reikšmės. Sėjinukai klasifikuoti į keturias klases pagal genetinę kilmę: Lietuvos, Rusijos, Ispanijos ir Suomijos. Klasifikavimas buvo atliekamas per kiekvieną duomenų surinkimą. Klasifikavimo tikslumo įvertinimo rezultatai pateikiami 3 lentelėje.

2 lentelė. Pagrindinių komponentių paaiškinta paprastosios pušies populiacijų sėjinukų spyglių spektrinių duomenų dispersijos dalis (%) ir spektro juostos, geriausiai išreiškiančios skirtumus tarp paprastosios pušies populiacijų spyglių spektrų

Table 2. The percentage of the total variance in the spectral reflectance of needles of Scots pine populations explained by the principal components (PC) at each sampling occasion and the most important wavelengths for each PC

Tyrimo data Date of samples acquisition	Pagrindinė komponentė / Principal component (PC)									
	PC1		PC2		PC3		PC4		PC5	
	Paaškinta dispersijos dalis Variance explained	Informatyviausia juosta Most informative wavelength	Paaškinta dispersijos dalis Variance explained	Informatyviausia juosta Most informative wavelength	Paaškinta dispersijos dalis Variance explained	Informatyviausia juosta Most informative wavelength	Paaškinta dispersijos dalis Variance explained	Informatyviausia juosta Most informative wavelength	Paaškinta dispersijos dalis Variance explained	Informatyviausia juosta Most informative wavelength
2015 01 16	72,2 %	708,6 nm	13,3 %	699,7 nm	6,3 %	703,5 nm	3,1 %	705,4 nm	1,2 %	404,0 nm
2015 02 05	60,4 %	717,5 nm	28,5 %	707,3 nm	4,3 %	406,3 nm	1,2 %	709,3 nm	0,5 %	714,3 nm
2015 03 02	78,5 %	699,7 nm	10,2 %	764,1 nm	4,0 %	408,5 nm	1,8 %	418,2 nm	0,6 %	408,5 nm

3 lentelė. Paprastosios pušies sėjinukų klasifikavimo pagal jų spektrinius duomenis tikslumas

Table 3. The accuracy of classification of Scots pine seedlings using the reflectance data

Data Date	Populiacijos Populations	Suklasifikuota į grupes vnt. Classified into groups, pcs					„Vykdytojo“ tikslumas % “Producer’s” accuracy, %
		FI	LT	RU	SP	Total	
2015 01 16	Suomijos / Finnish	3	0	0	0	3	100,0
	Lietuvos / Lithuanian	0	9	2	0	11	82,0
	Rusijos / Russian	0	6	5	0	11	45,0
	Ispanijos / Spanish	0	2	0	1	3	33,0
	Total	3	17	7	1	28	
„Vartotojo“ tikslumas % / “User’s” accuracy, %		100,0	53,0	71,0	100,0		
Bendras klasifikavimo tikslumas % / Overall classification accuracy, %							64,3
k̂ statistika / Kappa statistic							0,45
2015 02 05	Suomijos / Finnish	1	1	1	0	3	33,0
	Lietuvos / Lithuanian	0	10	1	0	11	91,0
	Rusijos / Russian	0	1	9	0	11	82,0
	Ispanijos / Spanish	0	1	0	3	3	100,0
	Total	1	12	11	3	28	
„Vartotojo“ tikslumas % / “User’s” accuracy, %		100,0	83,0	82,0	100,0		
Bendras klasifikavimo tikslumas % / Overall classification accuracy, %							85,2
k̂ statistika / Kappa statistic							0,73
2015 03 02	Suomijos / Finnish	3	0	0	0	3	100,0
	Lietuvos / Lithuanian	0	8	3	0	11	73,0
	Rusijos / Russian	0	4	6	1	11	55,0
	Ispanijos / Spanish	0	0	2	1	3	33,0
	Total	3	12	11	2	28	
„Vartotojo“ tikslumas % / “User’s” accuracy, %		100,0	67,0	55,0	50,0		
Bendras klasifikavimo tikslumas % / Overall classification accuracy, %							64,3
k̂ statistika / Kappa statistic							0,46

Sausio mėn. Suomijos kilmų sėjinukai spektriniu požiūriu buvo patikimiau išskiriami iš kitų kilmų – 100 % jų klasifikuota teisingai. Suomijos paprastosios pušies populiacija iš tirtų kilmų yra šiauriausiai nutolusi, tyrimų metu ji pasižymėjo ankstyvu pumpurų sprogimu (Ispanijos – labiausiai nutolusi į pietus, pasižymėjusi didžiausiu „vartotojo“ tikslumu). Didžiausias bendras klasifikavimo tikslumas pasiektas vasario mėn. – 85,2 %, o k̂ statistikos reikšmė buvo atitinkamai 0,73. Kovo mėn. kilmų klasifikavimas nepasižymėjo dideliu tikslumu, tirti sėjinukai suklasifikuoti 64 % tikslumu. Suomijos kilmų sėjinukai spektriniu požiūriu pastebimiau skyrėsi nuo kitų – 100 % jų klasifikuota teisingai. Klasifikuojant Lietuvos ir Rusijos kilmes buvo daž-

niausiai klaidingai priskiriamos viena kitai, nes spektriniu požiūriu jos labai panašios. Tai galėtų būti paaiškinama tuo, kad šios kilmės geografiniu požiūriu yra arčiausiai viena kitos. Apibendrinant pažymėtina, kad paprastosios pušies spyglių spektrinio atspindžio reikšmės itin skiriasi pagal sėjinukų populiacijos šalis, todėl naudojant hiperspektrinio skenavimo technologiją galima nustatyti spektrinio atspindžio variaciją.

Ankstesniuose ASU mokslininkų atliktuose tyrimuose (Masaitis, 2013; Danusevičius et al., 2014) buvo nustatytos didesnės galimybės atpažinti paprastosios pušies skirtingų kilmų medžius. Nurodoma, kad klasifikuojant mėginius pagal spyglių atspindėtą elektromagnetinę spinduliuotę pasiekiamas didelis klasifikavimo tikslumas ($\hat{k} = 0,92$).

Beje, ten buvo nagrinėti taip pat keturi paprastosios pušies genetinės kilmės variantai, tačiau atstovaujantys kitoms geografinėms vietovėms. Mūsų tyrimuose pasiektas mažesnis paprastosios pušies sėjinukų klasifikavimo tikslumas ($\hat{k} = 0,73$), tačiau mes skenavome ir analizavome paprastosios pušies sėjinukus, išaugintus konteineriuose, t. y. ne tik spygliai, bet ir šakelės, substratas, konteinerio fragmentai. Mūsų pasiūlytas metodinis sprendimas – sėjinuką vaizduojančių dominančių sričių (ROI) išskyrimas – leidžia maksimaliai eliminuoti kitų objektų (ne spyglių) atspindžio įtaką spektrinėse kreivėse, tačiau, manytina, kad tai galėjo turėti įtakos spektrinių kreivių grynumui, o taip pat ir klasifikavimo tikslumui. Kiek mums žinoma, šiuo metu nėra paskelbtų mokslinių darbų, nagrinėjančių dirbtinomis sąlygomis išaugintų sėjinukų (traktuojant kaip miško maketą) hiperspektrinių vaizdų galimybes miško medžių genetiniuose tyrimuose. Manytume, kad šis paprastosios pušies sėjinukų populiacijų nustatymo galimybių naudojant hiperspektrinę skenavimą tyrimas (imituojant informacijos surinkimą iš orlaiviuose įmontuotos platformos) yra vienas pirmųjų tokio pobūdžio tyrimų. Manome, kad jie bus plėtojami ateityje.

Šie rezultatai leidžia tikėtis, kad skirtingų kilmės paprastosios pušies medžių lajas taip pat sėkmingai bus galima atpažinti iš didelės erdvinės skiriamosios gebos hiperspektrinių vaizdų, gautų orlaivyje sumontuotu hiperspektriniu jutikliu.

IŠVADOS

1. Pagrindinių komponentų analize (PCA) nustatyta, kad penkios pagrindinės komponentės paaiškino 95 % visos 995 spektro juostų informacijos, sukauptos 700–720 nm bangų zonoje.

2. Visų stebėjimų metu sėjinukų kreivės pasižymėjo tik jiems būdinga „laiptiška“ spektro kreivių forma geltonojoje–raudonojoje spektro dalyje, būdingu atspindžio reikšmių kritimu ~900–970 nm ir stabilizavimusi arba nežymiu kilimu ~980–1 000 nm artimosios infraraudonosios spektro zonos intervaluose.

3. Skirtingos populiacijos sėjinukai pasižymi įvairiu artimosios infraraudonosios spinduliuotės atspindžio intensyvumu: daugiausia Ispanijos – 45 %, mažiausia Rusijos – 30 %.

3. Nustatyta, kad keturias paprastosios pušies populiacijų klases pagal sėjinukų spektrinius

duomenis galima patikimai išskirti 85,2 % (\hat{k} statistika 0,73). Geriausiai tarpusavyje atsiskiria geografiškai labiausiai nutolusios populiacijos.

Gauta 2017 01 26
Priimta 2017 06 22

LITERATŪRA

1. Aardt V., Norris-Rogers M. 2008. Spectral-age interactions in managed, even-aged Eucalyptus plantations: Application of discriminant analysis and classification and regression trees approaches to hyperspectral data. *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 29. P. 1841–1845.
2. Asner G., Martin R. 2008. Spectral and chemical analysis of tropical forests: scaling from leaf to canopy levels. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 112. P. 3958–3970.
3. Ball A., Sanchez-Azofeifa A., Portillo-Quintero C., Rivard B., Castro-Contreras S., Fernandes G. 2015. Patterns of leaf biochemical and structural properties of cerrado life forms: Implications for remote sensing. *PLoS One*. Vol. 10(2).
4. Boschetti M., Brivio A., Carnesale D., Guardo D. 2006. The contribution of hyperspectral remote sensing to identify vegetation characteristics necessary to assess the fate of persistent organic pollutants (POPs) in the environment. *Annals of Geophysics*. Vol. 49. P. 177–186.
5. Campbell P., Rock B., Martin M., Neefus C., Irons J., Middleton E., Albrechtova J. 2004. Detection of initial damage in Norway spruce canopies using hyperspectral airborne data. *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 25. P. 5557–5584.
6. Carter G., Knapp A. 2001. Leaf optical properties in higher plants: linking spectral characteristics to stress and chlorophyll concentration. *American Journal of Botany*. Vol. 88(4). P. 677–684.
7. Cho M., Skidmore A. 2006. A new technique for extracting the red edge position from hyperspectral data: The linear extrapolation method. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 101(2). P. 181–193.
8. Clark M., Roberts D., Clark D. 2005. Hyperspectral discrimination of tropical rain forest tree species at leaf to crown scales. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 96. P. 375–398.
9. Danusevicius D., Masaitis G., Mozgeris G. 2014. Visible and near infrared hyperspectral imaging reveals significant differences in needle reflectance among Scots pine provenances. *Silvae Genetica*. Vol. 63. Issue 4. P. 169–180.
10. Danusevičius D. 2007. *Miško medžių bandomųjų želdinių vadovas VĮ Kazlų Rūdos mokomojoje miškų urėdijoje*. Kaunas. P. 48–58.
11. Danusevičius D., Gabrielavičius R. 2003. *Eglės tyrimai ir selekcija Lietuvoje: monografija*. Vilnius. 364 p.

12. Donnelly K., Cavers S., Cottrell E., Richard A. 2016. Genetic variation for needle traits in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Tree Genetics & Genomes*. Vol. 12(3).
13. Fung T., Ma F., Siu W. 1998. Hyperspectral Data Analysis for Subtropical Tree Species Recognition. *IGARSS '98: Sensing and Managing the Environment: 1998 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings*. Piscataway, NJ: IEEE. Vol. 3. P. 1298–1300.
14. Heinzl J., Koch B. 2012. Investigating multiple data sources for tree species classification in temperate forest and use for single tree delineation. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. Vol. 18. P. 101–110.
15. Im J., Jensen J. 2008. Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation. *Geography Compass*. Vol. 2. Issue 6. P. 1943–1961.
16. Yahaya S. 2013. *Determination and Monitoring of Vegetation Stress Using Hyperspectral Remote Sensing*. PhD Thesis. University of Nottingham.
17. Manevski K., Manakos I., Petropoulos G., Kalaitzidis Ch. 2011. Discrimination of common Mediterranean plant species using field spectroradiometry. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. Vol. 13. P. 922–933.
18. Masaitis G., Mozgeris G., Augustaitis A. 2012. Spectral reflectance properties of healthy and stressed coniferous trees. *iForest – Biogeosciences and Forestry*. Vol. 6. P. 30–36.
19. Masaitis G. 2013. *The Potential of Hyperspectral Imaging to Detect Forest Tree Species and Evaluate Their Condition*. PhD thesis. Akademija, Lithuania: Aleksandras Stulginskis University. P. 150.
20. Mitri G., Gitas I. 2010. Mapping post-fire vegetation recovery using EO-1 Hyperion imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol. 48. P. 1613–1618.
21. Ogris N., Jurc M. 2010. Sanitary felling of Norway spruce due to spruce bark beetles in Slovenia: A model and projections for various climate change scenarios. *Ecological Modelling*. Vol. 221. Issue 2. P. 290–302.
22. Pontius J., Martin M., Plourde L., Hallett R. 2008. Ash decline assessment in emerald ash borer-infested regions: A test of tree-level, hyperspectral technologies. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 112. No. 5. P. 2665–2676.
23. Peerbhay K., Mutanga O., Ismail R. 2013. Commercial tree species discrimination using airborne AISA Eagle hyperspectral imagery and partial least squares discriminant analysis (PLS-DA) in KwaZulu-Natal, South Africa. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol. 79. P. 19–28.
24. Rashmi S., Addamani S., Venkat, Ravikiran S. 2014. Spectral Angle Mapper Algorithm for Remote Sensing Image Classification. *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*. Vol. 1. Issue 4. P. 201–205.
25. Schwartz M., Luikart G., Waples R. 2007. Genetic monitoring as a promising tool for conservation and management. *Trends in Ecology and Evolution*. Vol. 22. P. 25–33.
26. Smith M., Martin M., Plourde L., Ollinger S. 2001. Analysis of hyperspectral data for estimating temperate forest canopy nitrogen concentration: Comparison between an Airborne (AVIRIS) and a Spaceborne (Hyperion) sensor. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol. 41. P. 1332–1337.
27. Smith M., Ollinger S., Martin M., Aber J., Hallett R., Goodale C. 2002. Direct estimation of aboveground forest productivity through hyperspectral remote sensing of canopy nitrogen. *Ecological Applications*. Vol. 12. P. 1286–1302.
28. Smith N., Borstad G., Hill D., Kerr R. 1991. Using high resolution airborne spectral data to estimate forest leaf area and stand structure. *Canadian Journal of Forestry Research*. Vol. 7. P. 1127–32.
29. Sundblad L., Andersson M., Geladi P., Salomanson A., Sjoström M. 2001. Fast, nondestructive measurement of frost hardiness in conifer seedlings by VIS+NIR spectroscopy. *Tree Physiology*. Vol. 21. P. 751–757.
30. Susan L., Ustin A., Gitelson A. 2009. Retrieval of foliar information about plant pigment systems from high resolution spectroscopy. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 113. P. 67–77.
31. Timothy L., White W., Adams D., Neale B. 2007. *Forest Genetics*. Cambridge, MA: CABI Publishing.
32. Vauhkonen J., Ene L., Gupta S., Heinzl J., Holmgren J., Pitkanen J. 2012. Comparative testing of single-tree detection algorithms under different types of forest. *Forestry*. Vol. 85(1). P. 27–40.
33. Zhang X., Liu F., He Y., Xiaoli L. 2012. Application of hyperspectral imaging and chemometric calibrations for variety discrimination of maize seeds. *Sensors (Basel)*. Vol. 12(12). P. 17234–17246.
34. Zuzana L., Lukáš B., Lucie K., Veronika K., Markéta P., Jan M., Aleš K., Monika K., Jana A. 2013. Detection of multiple stresses in Scots pine growing at post-mining sites using visible to near-infrared spectroscopy. *Environmental Science: Processes & Impacts*. Vol. 15. P. 2004–2015.
35. Wang J., Chang C. 2005. Mixed PCA/ICA spectral/spatial compression for hyperspectral imagery. *Proceedings of SPIE 5995, Chemical and Biological Standoff Detection III, 599502*. Boston, MA.
36. Wold H. 1975. Path models with latent variables: The NIPALS approach. In: *Quantitative Sociology: International Perspectives on Mathematical and Statistical Modeling*. New York: Academic Press. P. 307–357.
37. White T., Adams W., Neale D. 2007. *Forest Genetics*. Cambridge: CAB International.

Vytautė Juodkienė, Darius Danusevičius,
Gintautas Mozgeris

IDENTIFICATION FOR GENETIC DIFFERENTIATION OF SCOTS PINE SEEDLINGS USING HYPERSPECTRAL IMAGING

S u m m a r y

Genetic diversity is an important component of biological diversity and therefore there are attempts to search for effective solutions that increase the effectiveness of genetic diversity assessment methods. The article represents the study that aims for genetic differentiation of Scots pine seedlings based on data, obtained using the hyperspectral imaging in the laboratory. Hyperspectral imaging is the technology that combines image and spectroscopy. Seedlings of 4 distant Scots pine populations from Lithuania (LT), Russia (RU), Spain (SP) and Finland (FIN) were selected for testing. One year old seedlings grown in containers under laboratory conditions were scanned with a hyperspectral camera with an integrated sensitive spectroscopy that splits the electromagnetic radiation into 955 spectrum bands in the range of 400 to 1000 nm. The seedlings of different populations had a different reflectance intensity of the near-infrared radiation (750–955 nm). Meanwhile, in the visible spectrum area (400–700 nm) their spectral properties were similar. The Analysis of the Principal Components (PCA) showed that for the differentiating of seedling populations five spectrum bands might be used, which accumulated significant information in the range of 700–720 nm. It was found that the genetic origin classes of the Scots pine can be distinguished reliably (in 85.2% of cases) using the Discriminant Analysis of the seedling's spectral data. The most geographically distant Spanish and Finnish populations are the most mutually separated populations. The results demonstrate the potential of defining tree genetic properties/origin remotely by using hyperspectral scanners installed in aircrafts.

Keywords: genetic diversity, spectral properties, classification accuracy