Rasa Šimanauskienė [1, 2], Rita Linkevičienė [1], Julius Taminskas [1], Gintautas Kibirkštis [1], Onutė Grigaitė [3]

[1] Gamtos tyrimų centras, [2] Vilniaus universiteto Chemijos ir geomokslų fakulteto Geomokslų institutas, [3] Dzūkijos nacionalinio parko ir Čepkelių valstybinio gamtinio rezervato direkcija

NUOTOLINIŲ METODŲ TAIKYMAS AUKŠTAPELKIŲ KRAŠTOVAIZDŽIO KAITOS TYRIMUOSE

Anotacija

Dėl antropogeninės veiklos ir klimato kaitos pastaraisiais dešimtmečiais aukštapelkių kraštovaizdis keičiasi. Nuo XX a. septintojo dešimtmečio mažėja šiltojo laikotarpio kritulių kiekis ir intensyvėja garavimas. Toks hidrologinis režimas mažiau palankus atviroms aukštapelkėms, jos vis labiau užauga medžiais. Tai dar labiau skatina aukštapelkių ar jų apypelkio sausinimas. Įsivyrauja pelkinių miškų buveinės, mažėja aukštapelkių (aktyvių, degradavusių ir kitų) ir tarpinio tipo pelkių biologinė įvairovė bei jų kraštovaizdžio raiška.

Aukštapelkių tyrimuose vis dažniau taikomi nuotoliniai metodai. Pristatome tyrimą, kurio metu įvairiuose aukštapelkės buveinių tipuose (plynėse, plynraisčiuose ir raistuose) nustatytos spektrinių normalizuotų augalijos (angl. *Normalized Difference Vegetation Index,* NDVI) ir vandens (angl. *Normalized Difference Water Index,* NDWI) indeksų reikšmės bei jų sąveika su gruntinio vandens gyliu. Darbo rezultatai leidžia teigti, kad aukštos rezoliucijos palydovinių nuotraukų duomenys galėtų būti efektyviai pritaikomi būsimiems aukštapelkių kraštovaizdžio raidos tyrimams.

Abstract

In recent decades, the obvious transformations of raised bog landscape can be observed due to anthropogenic activities and climate change. Active and degraded raised bog habitats are being occupied by bog woodlands. This reduces, biodiversity, landscape diversity and attractiveness of raised bogs ant their surroundings. Since the 1960s, a reduction in warm-season rainfall and an increase in evapotranspiration have been changing the hydrological regime, making it less and less favourable for open raised bogs. The expansion of woody vegetation is also strengthened by the drainage of raised bogs or their surroundings. Remote sensing techniques are being successfully used to study raised bog landscape change. Our study revealed that the patterns in the distribution of spectral indices (NDVI and NDWI) values in the different types of raised bog habitats (open raised bogs, semi-open raised bogs, and bog woodlands) suggest that high-resolution satellite imagery data could be applied to further studies of raised bog landscape evolution.

Raktiniai žodžiai: Čepkeliai, aukštapelkių hidrologija, aukštapelkė, raistas, plynraistis, plynė, NDVI, NDWI.

Keywords: Čepkeliai, raised bog hydrology, raised bog, bog woodland, semi-open raised bog, open raised bog, NDVI, NDWI.

ĮVADAS

Jautriose ir sunkiai prieinamose teritorijose, o tokios ir yra aukštapelkės, nuotolinių metodų taikymas galėtų turėti ypač plačias perspektyvas. Didelės rezoliucijos ir vis ilgėjančios chronologinės duomenų sekos leistų patikimai analizuoti šių teritorijų reakciją į antropogeninius ir klimato kaitos pokyčius, taip pat įvertinti aukštapelkių reikšmę hidroklimatinių sistemų stabilumo požiūriu. Tokiam nuotolinių duomenų panaudojimui ir

jų interpretavimui svarbu gerai suprasti aukštapelkėse vykstančių procesų ir jų spektrinių atspindžių, fiksuojamų kosmose, ryšį. Juolab, kad pati aukštapelkė yra dviejų glaudžiai susijusių ir vienas kitą veikiančių elementų – vandens ir augalijos – visuma. Pagrindinė aukštapelkės augalų šaknų masė susitelkusi viršutiniame durpių (iki 40 cm gylio), o kartais net ir kiminų sluoksnyje. Dėl tokios šaknų sistemos pušys aukštapelkėse daug jautriau reaguoja į gruntinio vandens lygio pokyčius nei augančios mineraliniame grunte. Jos turi prisitaikyti prie nuolat kintančio gruntinio vandens lygio, mažo mineralinių medžiagų ir deguonies kiekio bei didelių temperatūros svyravimų šaknų zonoje (Sinkevičius, 2001).

Dėl klimato kaitos, pelkių sausinimo, išnykusios tradicinės ekstensyvios žemės ūkio veiklos dabartiniu metu Lietuvoje ir kitose šalyse stebimas atvirų aukštapelkių kraštovaizdžio virsmas į miškingą kraštovaizdį (Cedro, Lamentowicz, 2008; Berg ir kt., 2009; Edvardsson ir kt., 2015; Čugunovs ir kt., 2016). Valstybinio Čepkelių gamtinio rezervato miškotvarkos projektų duomenys rodo, kad paskutiniaisiais XX a. dešimtmečiais atvirų aukštapelkių plotai nuolat mažėjo: 1988 m. inventorizuota 400 ha naujų miškų, 2002 m. – dar 1 600 ha, o bemiškių plotų likę tik 2 500 ha, t. y. 43 % aukštapelkės ploto (Stončius ir kt., 2004). Miškingų plotų didėjimo tendencija išliko ir XXI a. pradžioje. Tai vienas aiškiausių ilgalaikių kraštovaizdžio pokyčių aukštapelkių ekosistemoje.

Didelė dalis Lietuvos pelkių paveiktos sausinimo ir kasybos darbų. Todėl daug dešimtmečių apsaugos statusą turintis Čepkelių pelkių kompleksas yra unikalus, nes jame galima analizuoti natūralius gamtinių procesų ryšius ir tobulinti spektrinių indeksų interpretaciją. Pagrindinė šio tyrimo idėja – taikant nuotolinius metodus įvairiose aukštapelkės buveinėse įvertinti augalijos būklę ir joje esančios drėgmės kiekį bei gruntinio vandens gylio ir augalijos indeksų ryšius. Svarbiausi uždaviniai: 1) įvertinti vertikalią aukštapelkės struktūrą ir remiantis mėdine augalija išskirti aukštapelkės buveinių tipus; 2) remiantis NDVI ir NDWI spektriniais indeksais įvertinti aukštapelkės buveinių būklę; 3) įvertinti ryšius tarp augalijos, gruntinio vandens lygio ir spektrinių indeksų.

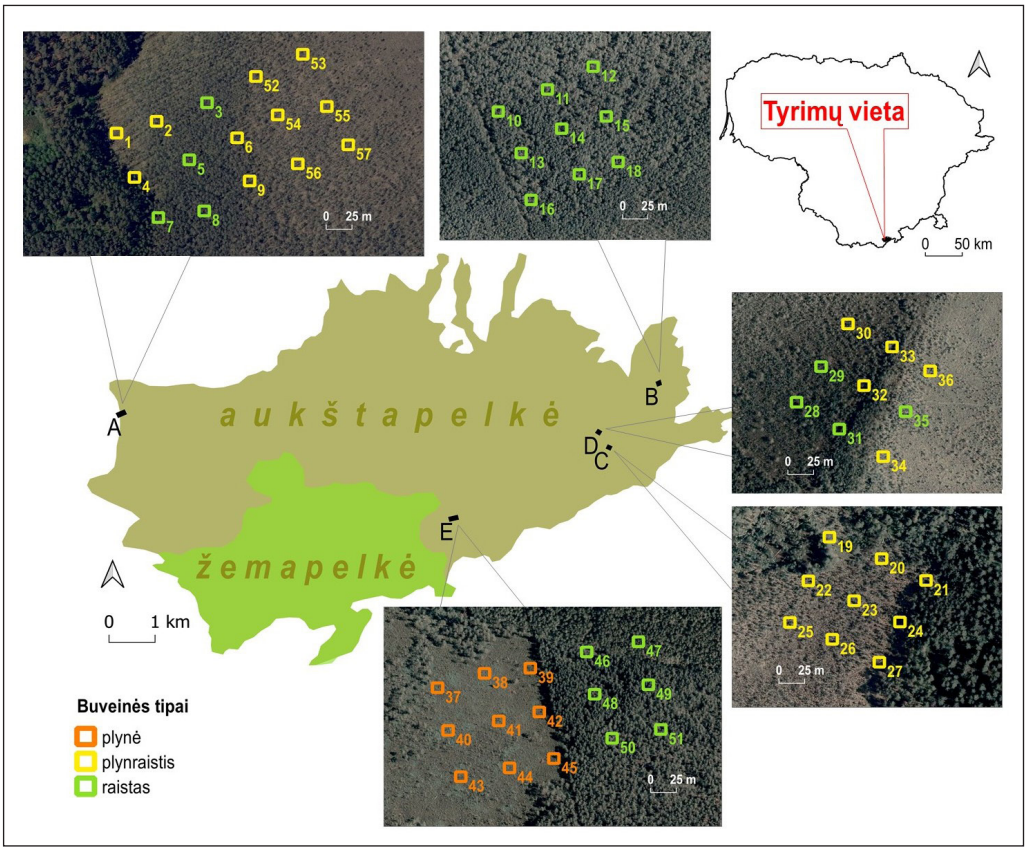
TYRIMO OBJEKTAS IR METODAI

Čepkeliai (54°00'N, 24°30'E) – vienas didžiausių Lietuvos pelkių kompleksų (5 858 ha), kurį sudaro aukštapelkės (82 %), žemapelkės (16 %) ir tarpinio tipo pelkės (2 %) (1 pav.). Jame yra keletas mineralinio substrato salų ir 21 mažas pelkinis ežeriukas. Vidutinis durpių gylis – apie 2,3 m, bet organinės nuosėdos vietomis gali siekti net 16,5 m (Stančikaitė ir kt., 2019). Šis tyrimas vykdytas tik aukštapelkinėje Čepkelių dalyje.

Norint įvertinti vandens gylį pasirinktos 5 tyrimų vietos (A, B, C, D, E) (1 pav.) ir įrengti 57 vandens gylio matavimo gręžiniai. Vandens gylio matavimai atlikti 2019–2020 m. aktyvios vegetacijos laikotarpiais (gegužės–rugsėjo mėn.), šie duomenys naudoti tolesnėje analizėje. Siekiant išskirti aukštapelkės buveinių tipus atliktas *in situ* augalijos įvertinimas, o aplink kiekvieną vandens gylio matavimo gręžinį išskirti tyrimų laukeliai (10×10 m). Nustatyta medžių, krūmų, žolių ir samanų ardų rūšių sudėtis, taip pat kiekvienos rūšies projekcinio padengimo plotas (procentais). Augalų rūšių nomenklatūra pateikta, remiantis *Euro+Med PlantBase* (Euro+Med, 2006), o samanų – pagal Europos, Makaronezijos ir Kipro samanų sąrašus (Hodgetts ir kt., 2020).

Norint įvertinti augalijos būklę ir vandens kiekį joje, kiekviename tyrimų laukelyje, taikant 2015–2020 m. vegetacijos sezonų SENTINEL 2 duomenis, apskaičiuoti NDVI ir NDWI indeksai. Ilgalaikės NDVI pokyčių tendencijos įvertintos naudojant *Terra* MODIS palydovo 2000–2020 m. duomenis. Skaičiavimai atlikti SNAP ir *ArcGis* programine įranga.

Normalizuoto skirtumo augalijos indeksas – NDVI = (NIR – Red) / (NIR + Red), čia NIR – artimoji infraraudonoji spinduliuotė (angl. *Near Infra-Red*), Red – matomų spindulių spektro – raudonos spalvos bangos



1 pav. Čepkelių pelkės tyrimo laukelių tinklas ir juose nustatyti aukštapelkės buveinių tipai
Fig. 1. The network of study areas and the types of raised bog habitats

ilgis (angl. *Red*). Kiekybiškai augaliją įvertinantis NDVI indeksas apskaičiuojamas matuojant skirtumą tarp spindulių, kuriuos augalija atspindi (NIR) ir sugeria (Red). Jo vertės kinta nuo –1 iki 1. Mažesnės už nulį NDVI reikšmės rodo, kad paviršius be augalijos, o didesnės už nulį – kad augalijos danga su skirtingu fotosintezės pajėgumu – kuo didesnės vertės, tuo sveikesnė augalija.

Normalizuoto skirtumo vandens indeksas – NDWI = (NIR – SWIR) / (NIR + SWIR), čia SWIR – trumpabangė infraraudonoji spinduliuotė (angl. *Short Wave Infrared*). Vidinėje lapų struktūroje esantis vandens kiekis iš esmės kontroliuoja spektrinį atspindį elektromagnetinio spektro SWIR intervale (Gao, 1996). Augalijos vidinė struktūra ir lapų sausoji masė kontroliuoja atspindžio koeficientą NIR intervale. Šių kanalų derinys leidžia atskirti vandens kiekį augalijoje. NDWI reikšmės svyruoja nuo –1 iki 1. Kuo didesnės indekso reikšmės, tuo didesnis vandens kiekis augalijoje.

Vertinant ryšius tarp hidrologinių, botaninių ir spektrinių rodiklių remtasi Pearsono tiesinės koreliacijos koeficientu. Duomenys apdoroti naudojantis MS *Excel* programine įranga, o koreliacijos statistiniam reikšmingumui įvertinti taikyta reikšmė $p < 0,05$.

AUKŠTAPELKĖS BUVEINIŲ TIPŲ IŠSKYRIMAS

Pagal šaltiniuose (Rašomavičius ir kt., 2012; Tupčiauskaitė, 2012) pateikiamus kriterijus ir lauko tyrimų patirtį, 57 tyrimo laukeliai buvo suskirstyti į tris aukštapelkės buveinių tipus (1 lentelė, 1, 2 pav.).

1 lentelė. Taikyti aukštapelkės tipų pagal medžių augimo pobūdį išskyrimo kriterijai.
Table 1. Criteria of raised bog ecosystem types based on tree growth characteristics.

Aukštapelkės buveinių tipas	Padengimas medžiais, %	Maksimalus medžių aukštis, m	Vyraujanti ekologinė pušų forma
Plynė	<20	≤1	*f. willkommii*
Plynraistis	21–40	<5	*f. litwinowii*
Raistas	≥40	≥5	*f. uliginosa*

Penkiuose pasirinktuose Čepkelių pelkės tyrimo plotuose (A–E), kuriuose išskirti 57 laukeliai, padengimas skirtinga augalija plačiai kinta. Apibendrinus tyrimų duomenis nustatyta, kad didžiausias vidutinis padengimas medžiais yra B ir C plotų laukeliuose, skaičiuojant procentais, juose didžiausias vidutinis padengimas žaliosiomis samanomis bei mažiausias – kiminais. A, D ir E plotai pasižymi didesniu padengimu kiminais. Plynėms priskirtuose laukeliuose vidutiniškai didžiausias padengimas krūmokšniais (2 lentelė).

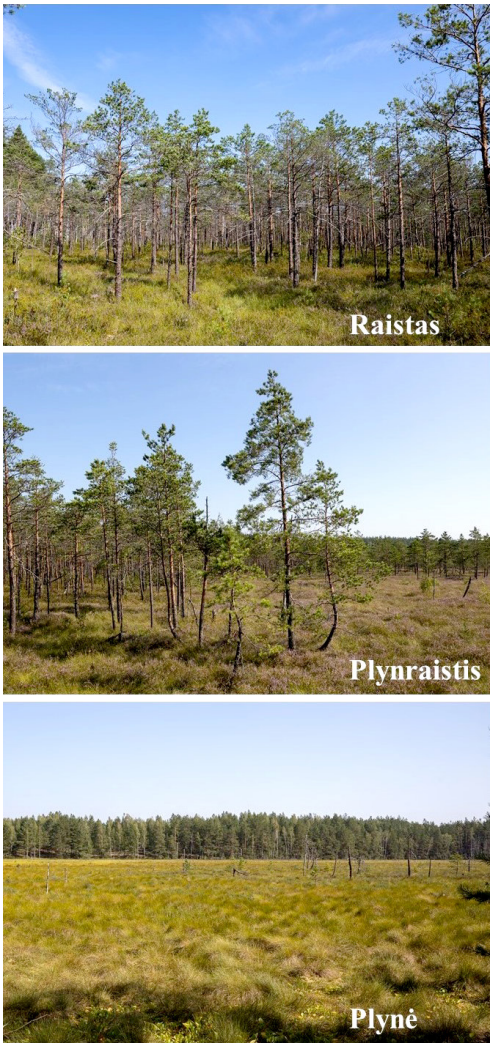
2 lentelė. A–E plotų bei skirtingų aukštapelkės tipų tyrimo laukelių padengimas įvairiais augalijos ardais (%) (vid. (min.–maks.)).

Table 2. Distribution of vegetation layers coverage in the fields (%) by different study sites and by different raised bog types (avg. (min.-max.)).

Ardai ir samanų poklasiai	Tyrimo plotas					Aukštapelkės ekosistemos tipas		
	A	B	C	D	E	Raistas	Plynraistis	Plynė
Medžiai	32 (8–63)	53 (30–77)	48 (34–62)	37 (18–70)	23 (12–41)	48 (22–77)	33 (8–62)	17 (12–24)
Krūmokšniai	38 (27–58)	48 (31–66)	18 (1–42)	44 (26–57)	42 (22–67)	41 (22–66)	32 (1–58)	49 (27–67)
Žolės	14 (5–25)	7 (3–15)	29 (16–47)	10 (5–25)	6 (2–10)	8 (2–20)	19 (5–47)	5 (4–8)
Žaliosios samanos	12 (1–30)	42 (17–63)	24 (8–40)	8 (5–18)	18 (5–38)	24 (1–63)	15 (3–40)	21 (9–38)
Kiminai	78 (60–90)	47 (30–65)	67 (58–80)	81 (73–88)	69 (50–85)	66 (30–90)	75 (58–88)	63 (50–81)
Kerpės	0,0 (0–0,1)	0,0 (0–0,2)	0	1,2 (0–4)	0	0,1 (0–2)	0,2 (0–4)	0

REZULTATAI

Plynės. *Augalija.* Tirti Čepkelių pelkių komplekso plynių plotai pasižymi didžiausiu padengimu kiminų ir krūmokšnių ardais (2 lentelė). Medžių arde vyrauja iki 1 m aukščio paprastosios pušies (*Pinus sylvestris*) žemaūgės formos medeliai, be to, lyginant su kitais aukštapelkės tipais, čia dažniau randama karpotųjų (*Betula pendula*) ir plaukuotųjų beržų (*B. pubescens*) bei paprastųjų eglių (*Picea abies*). Krūmokšnių arde, lyginant su kitų aukštapelkės buveinių tipų laukeliais, gausiausiai paplitę šiliniai viržiai (*Calluna vulgaris*) ir vaivorai (*Vaccinium uliginosum*). Žolių ardas negausus, randami tik kupstiniai švyliai (*Eriophorum vaginatum*). Tarp žaliųjų samanų vyrauja pelkinės tranšės (*Aulacomnium palustre*), o tarp kiminų – *Sphagnum sect. Cuspidata.*



2 pav. Raisto, plynraisčio ir plynės fragmentai Čepkelių pelkėje
Fig. 2. Bog woodland, semi-open raised bog, and open raised bog fragments in Čepkeliai raised bog

Tyrimui pasirinktos plynės augalijos struktūra ir rūšių sudėtis patvirtino spėjimą, kad ji suformuota 1992 m. vykusio gaisro. Po jo padaugėjus maistinių medžiagų čia dažniau nei kituose plotuose randama beržų ir eglių, didelis padengimas krūmokšnių ardo augalais. Tyrimas patvirtino faktą, kad pelkių sausėjimas labai palankus gaisrams, kurie didindami plynių plotus keičia aukštapelkių kraštovaizdį (Manton ir kt., 2022).

Hidrologija. Vandens gylio matavimai plynėje rodo, kad, lyginant su kitais aukštapelkės buveinių tipais, čia vandens gylio svyravimo amplitudė atskiruose tyrimų taškuose yra didžiausia, bet intervalas, į kurį patenka visi plynėje išmatuoti vandens gylio duomenys, – pats siauriausias (3 pav.). Tam įtakos gali turėti plynei priskiriamų tyrimo taškų padėtis – visi jie yra viename plote. Kitų aukštapelkės tipų tyrimo taškai išsibarstę keliuose plotuose, kuriuose skiriasi durpių sluoksnio storis ir kitos aukštapelkės savybės.

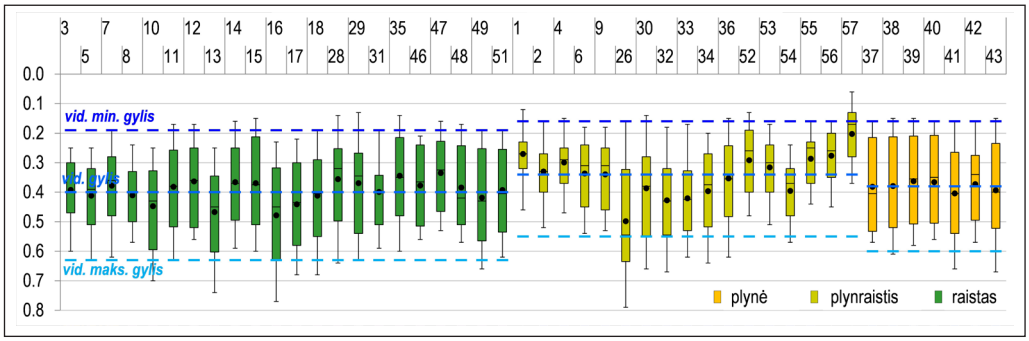
Palydoviniai indeksai. Analizuojant NDVI ir NDWI indeksų reikšmių pasiskirstymą plynėse, lyginant su kitais buveinių tipais, stebimos žemesnės abiejų indeksų reikšmės, bet didesnė kaitos amplitudė. Plynėje paplitusios žemesniųjų ardų augalijos būklės (NDVI), o joje sukauptos drėgmės (NDWI) kaita vyksta gana sinchroniškai, ryškiau atspindėdama metinius augimo ciklus (4 pav.).

Analizuojant vandens gylio ir palydovinių indeksų koreliaciją skirtinguose pelkės tipuose, plynėje nustatyta stipri vandens gylio koreliacija su abiem (NDVI ir NDWI) indeksais (3 lentelė).

3 lentelė. Pearsono koreliacijos koeficientai, lyginant vienalaikius vandens gylio bei NDVI ir NDWI duomenis (statistinis reikšmingumas $p < 0,05$).
Table 3. Pearson correlation coefficients, comparing simultaneous water table depth and NDVI/NDWI data (statistical significance $p<0.05$).

Visi tyrimo plotai	Tyrimo plotai							Aukštapelkės buveinių tipas		
	A	B	C*	D	E	E’	E”	Raistas	Plynraistis	Plynė
Vandens gylio ir NDVI koreliacija										
0,50	0,62	0,37	0,71	0,48	0,61	0,84	0,47	0,43	0,38	0,87
Vandens gylio ir NDWI koreliacija										
0,62	0,37	0,71	0,48	0,61	0,62	0,87	0,76	0,64	0,36	0,84

* Statistiškai reikšmingi duomenys, gauti viename tyrimų laukelyje.



3 pav. Vandens gylio reikšmių (m žemiau paviršiaus) pasiskirstymas įvairių aukštapelkės tipų tiriamuosiuose ploteliuose 2019–2020 m. Plotelių išsidėstymo schema pateikta 1 pav.
Fig. 3. Distribution of water depth values (m below the surface) in the study areas for the different raised bog types in 2019–2020. Distribution of the areas is shown in Fig. 1

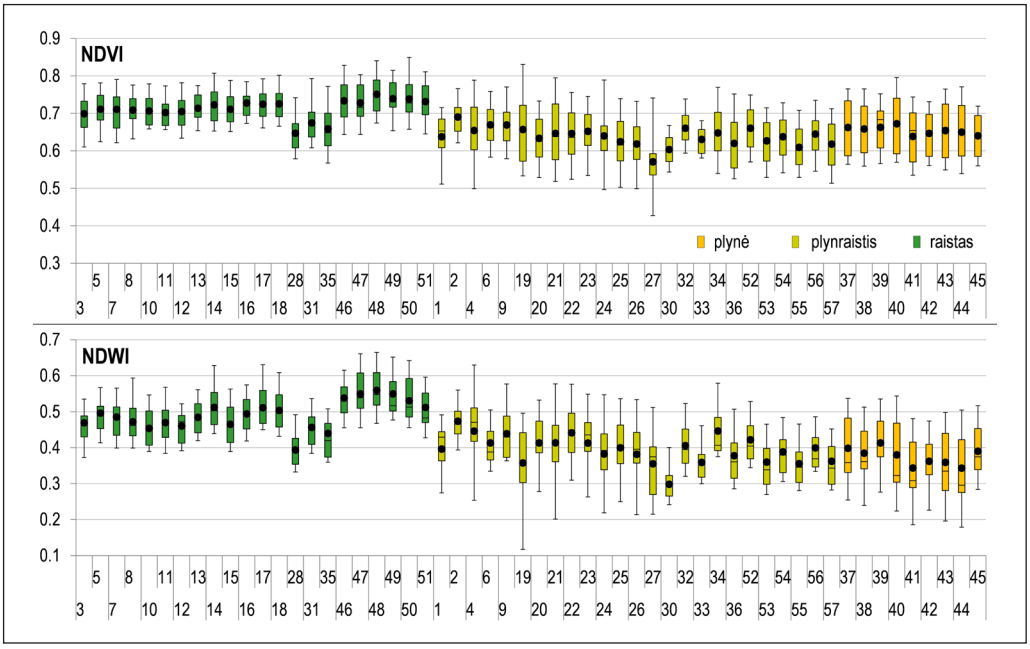
Plynės tyrimo laukeliai pasižymi didžiausia NDWI kaita (4 pav.). Visuose plynės laukeliuose nustatyta vidutinė koreliacija tarp NDVI ir NDWI – Pearsono koeficientas kinta nuo 0,53 iki 0,65. Tai rodo, kad plynėje paplitusios žemesniųjų ardų augalijos būklė (NDVI) ir joje sukauptos drėgmės (NDWI) kaita vyksta gana sinchroniškai, ryškiau atspindėdama metinius augimo ciklus.

Plynraisčiai. ***Augalija.*** Plynraisčių laukeliuose, lyginant su kitais aukštapelkės tipais, didesnis žolių projekcinis padengimas (2 lentelė). Vyrauja 1–5 m aukščio paprastosios pušys (*Pinus sylvestris*). Krūmokšnių arde daugiausia paplitę šiliniai viržiai ir paprastosios spanguolės (*Vaccinium oxycoccos*), taip pat, lyginant su kitų aukštapelkės tipų laukeliais, gausiau auga siauralapės balžuvos (*Andromeda polifolia*). Žolių arde, be kupstinių švylių, dar randama melsvųjų melvenių (*Molinia coerulea*), paprastųjų viksvų (*Carex nigra*), apskritalapių saulašarių (*Drosera rotundifolia*) ir snapuotųjų viksvų (*Carex rostrata*). Tarp žaliųjų samanų vyrauja durpyniniai gegužliniai (*Polytrichum strictum*), o tarp kiminų – *Sphagnum sect. Acutifolia.* Plynraisčių laukeliuose randama ir kerpių.

Hidrologija. Plynraisčiuose tarp skirtingų matavimo taškų fiksuota didelė vandens gylio įvairovė, nors atskiruose taškuose, lyginant su kitais aukštapelkės tipais, vandens gylis svyruoja mažiausiai. Taigi, lokalios sąlygos plynraistyje, kintančioje medžiais užaugančioje buveinėje, pasižymi didžiausia įvairove.

Palydoviniai indeksai. Plynraisčio ir plynės laukelių indeksų vidutinės reikšmės ir kaitos amplitudės panašios. Tačiau plynėje visuose laukeliuose būdingas gana panašus reikšmių pasiskirstymas, o plynraistyje, lyginant atskirų laukelių indeksų reikšmių pasiskirstymą, matoma didelė įvairovė (4 pav.). Koreliacija tarp vandens gylio bei NDVI ir NDWI plynraistyje silpna, nors kai kuriuose atskiruose laukeliuose nustatyti ir aukštą koreliaciją rodantys koeficientai (3 lentelė). Plynraisčio tyrimo laukeliai pasižymi didžiausia NDVI kaita (4 pav.), o koreliacija tarp NDVI ir NDWI labai įvairi – pusėje laukelių ji žema, trečdalyje – vidutinė, o keturiuose – nereikšminga. Tai rodo, kad lokalinės (hidrologinės, botaninės (rūšių sudėtis)) kiekvieno tyrimo taško plynraistyje sąlygos lemia ir palydovinių indeksų tarpusavio sąsajas.

Raistai. ***Augalija.*** Raistams priskirtuose tyrimo laukeliuose nustatytas didžiausias medžių ir žaliųjų samanų ardų projekcinis padengimas (2 lentelė). Raisto tyrimo laukeliuose medžių arde vyrauja įvairių ekologinių formų (*f. litwinowii, f. uliginosa*) paprastosios pušys. Krūmokšnių arde vyrauja pelkiniai gailiai (*Rhododendron tomentosum*), žolių –



4 pav. NDVI ir NDWI reikšmių pasiskirstymas įvairių aukštapelkės tipų tiriamuosiuose ploteliuose 2019–2020 m. Plotelių išsidėstymas 1 pav.
Fig. 4. Distribution of NDVI and NDWI values for different types of raised bog in the study areas in 2019–2020. Distribution of the areas are shown in Fig. 1

kupstiniai švyliai (*Eriophorum vaginatum*), samanų – paprastosios šilsamanės (*Pleurozium schreberi*), o kiminų – Magelano kiminai (*Sphagnum magellanicum*).

Hidrologija. Raistams būdingesnis didesnis gruntinio vandens gylis, o NDVI ir NDWI reikšmės čia didžiausios. Tačiau jų kaita, lyginant su kitais aukštapelkės tipais, atskiruose laukeliuose mažiausia (4 pav.).

Palydoviniai indeksai. Raiste fiksuojamos aukščiausios NDVI ir NDWI indeksų reikšmės, bet mažiausia jų kaita (4 pav.). Tarp vandens gylio ir NDVI nustatyta žema koreliacija, tačiau tarp vandens gylio ir NDWI – koreliacija vidutinė. Vandens gylio koreliacijos koeficientas su NDVI atskiruose raisto tyrimo taškuose daugiausia statistiškai nereikšmingas, o su NDWI – reikšmingas (3 lentelė). Vertinant koreliaciją tarp palydovinių NDVI ir NDWI indeksų 2015–2020 m. nustatyta, kad dažniausiai raisto laukelių koreliacija nereikšminga – $r \leq 0{,}18$.

DISKUSIJA

Aukštapelkės kraštovaizdžio pokyčiai – tai augalijos ir vandens sąveikos atspindys. Tyrimas parodė, kad pastaraisiais dešimtmečiais vykstančio atvirų aukštapelkių užaugimo medžiais rodikliu galima laikyti plynraisčius. Jų ploto didėjimas atskleidžia pelkės raistėjimo dinamiką.

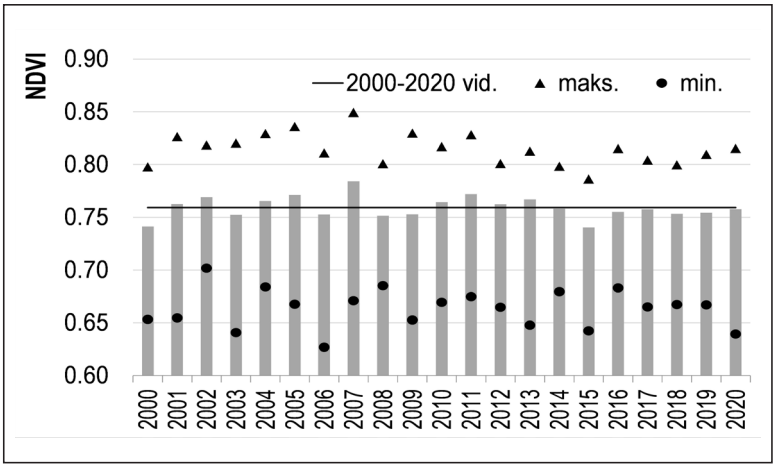
Čepkeliai – sudėtingas pelkinis kompleksas, turintis keturis ryškius pelkėjimo pradžios židinius, banguotą pelkyno dugno reljefą, čia nėra vienos ryškiai išreikštos centrinės dalies (Kibirkštis, 2002). Ankstesni tyrimai (Taminskas ir kt., 2018) parodė, kad pelkėje vandens apykaita netolygi, ji vyksta keliuose atviro ar uždaro drenažo subbaseinuose. Šio tyrimo metu įvairiose Čepkelių vietose išdėstytas vandens matavimų tinklas atskleidė, kad vandens gylio netolygumai pastebimi net ne tarp skirtingų pelkės subbaseinų, bet ir tame pačiame subbaseine

greta vienas kito (50–200 m atstumu) esančių gręžinių. Didžiausi vienalaikiai gruntinio vandens gylio skirtumai tarp vieno tyrimų ploto gręžinių siekė nuo 0,08 iki 0,31 m. Pelkės vandens gylio pasiskirstymo netolygumą rodo ir kitų autorių tyrimai (Howie, van Meerveld, 2013, 2019). Šiame tyrime vandens gylio matavimai buvo ne vienkartiniai, o truko du vegetacijos laikotarpius. Sukaupus daugiau duomenų atlikta koreliacinė analizė ir palyginti ne tik vienalaikiai vandens gylio skirtumai, bet ir jo kaitos sinchroniškumas įvairiuose aukštapelkės tyrimo taškuose. Koreliacinė matrica parodė, kad vandens gylio svyravimai gręžiniuose nėra identiški, o Pearsono koreliacijos koeficientas kinta nuo 0,59 iki 1,00. Taigi, viename taške vykstantys matavimai negali reprezentuoti net ir nedidelės aukštapelkės vandens režimo – tam reikalingas optimalus tyrimų tinklas, atspindintis įvairių aukštapelkės tipų vandens režimo ypatumus.

Gruntinio vandens gylis ir aukštapelkės augalijos netolygumas yra glaudžiai susiję ir vienas kitą veikiantys procesai. Žemėjant vandens lygiui aukštapelkėje aplinkos sąlygos tampa palankesnės mėdinei augalijai įsitvirtinti (Matulevičiūtė, Rašomavičius, 2007; Bönsel, Sonneck, 2012; Jarašius ir kt., 2015; Sinyutkina, 2021). Savo ruožtu dėl kritulių intercepcijos ir vandens transpiracijos medžiai skatina tolesnį vandens lygio žemėjimą (Van Seters, Price, 2002). Didėjantys mėdinės augalijos plotai pastebimi ne tik nusausintuose durpynuose, bet ir tokiose žmogaus beveik nepaliestose pelkėse, kaip Čepkeliai. Taigi šis pokytis sietinas ne tik su tiesioginiu antropogeniniu poveikiu, bet ir atspindi sudėtingesnius gamtinius procesus, pirmiausia – klimato pokyčius (Ratcliffe ir kt., 2017). Tiesa, reikia įvertinti ir tyrimų laikotarpiu buvusias klimato sąlygas. 2019–2020 m. gali būti apibūdinami kaip sausas laikotarpis. Pagal Lietuvos hidrometeorologijos tarnybos duomenis, 27 km į Šiaurę nuo Čepkelių pelkės esančioje Varėnos meteorologinėje stotyje (MS) 2019 m. kritulių kiekis siekė 489,2 mm, o 2020-aisiais – 524,5 mm, t. y. sudarė 70–75 % klimatinės normos (701 mm), o vegetacijos sezono metu – 64–69 % klimatinės normos.

Tyrimo metu nustatyti statistiškai reikšmingi ryšiai tarp įvairiems aukštapelkių buveinių tipams būdingos augalijos ir vandens gylio. Kuo didesnis vandens gylis, tuo daugiau pelkiniams miškams būdingos augalijos (medžių, žaliųjų samanų, pelkinių gailių), o kuo vanduo arčiau paviršiaus, tuo daugiau atviroms aukštapelkėms būdingų augalų – kiminų. Taigi, stebėdami miškų plotų didėjimą, galime daryti prielaidą ir apie ilgalaikes aukštapelkių gruntinio vandens gylėjimo tendencijas.

Nuotoliniai stebėjimai suteikia vertingos informacijos, leidžiančios apibūdinti pelkių



5 pav. Čepkelių aukštapelkės NDVI rodiklių kaita, remiantis *Terra* MODIS duomenimis
Fig. 5. Variation of the NDVI indicators of the Čepkeliai raised bog based on Terra MODIS data

būklę ir jų funkcionavimą (Bhatnagar ir kt., 2018) bei įvertinti ne tik augalijos struktūrą ir funkcijas, bet ir jų bei klimato kintamųjų sąsajas (Eamus ir kt., 2015). Lyginant 2019 ir 2020 m. visos Čepkelių aukštapelkės vidutinį NDVI su ankstesnių metų reikšmėmis (pagal ilgalaikius duomenis – *Terra* MODIS vaizdus), matyti, kad nuo 2016 m. šios reikšmės išlieka gana stabilios ir yra artimos vidutinei 2000–2020 m. reikšmei – 0,76. Tačiau NDVI kaitos amplitudė didėjo, o 2020 m. ji buvo viena didžiausių per visą tyrimų laikotarpį. Taigi, vegetacijos laikotarpiu augalų būklė gali reikšmingai keistis (5 pav.).

Remiantis spektriniais indeksais nustatyti ryšiai tarp aukštapelkės vandens gylio, augalijos tipų bei NDVI ir NDWI, suteikia galimybę įvertinti hidroklimatinių sąlygų kaitą ir jos poveikį susijusių vandens telkinių hidrologijai. Tačiau tos pačios datos (vienalaikių) vandens gylio reikšmių ir spektrinių indeksų palyginimas atskleidžia, kad šių rodiklių sezoniniai ciklai gali nulemti tam tikrą „triukšmą“ ilgalaikių kaitos tendencijų ar erdvinio pasiskirstymo dėsningumų atžvilgiu. Tarp vandens gylio ir spektrinių indeksų nustatyta teigiama koreliacija leistų daryti išvadą, kad augalų būklę aukštapelkėse veikia vandens kiekis ir jo gylis, – kuo jo kiekis didesnis ir kuo jis giliau nuo paviršiaus, tuo augalų būklė geresnė, ypač plynėse, kur ši koreliacija stipriausia. Tačiau tokia išvada nedera su erdviniais vandens gylio ir augalijos pasiskirstymo dėsningumais, nustatytais tiek ankstesniuose, tiek šiame tyrime. Geriausiai šį „nederėjimą“ paaiškina vandens gylio ir augalijos kaitos sezoniškumas. Arčiausiai paviršiaus vanduo aukštapelkėje būna, kai oro temperatūra žemiausia, o evapotranspiracija mažiausia, t. y. vegetacijos sezono pradžioje ir pabaigoje. Vegetacijos sezono viduryje, kai temperatūra ir evapotranspiracija kyla, vandens lygis žemėja, o augalų biomasė yra didžiausia. Plynėse, kur paplitę žemesniųjų ardų augalai, vandens lygio ir augalijos kaitos ciklai išreikšti ryškiausiai ir gerai tarpusavyje koreliuoja. Vandens lygio sezoninį ciklą raistuose geriausiai atitinka NDWI, parodantis vandens kiekį augalų dangoje, o kartu ir didėjančią šios dangos apimtį per vegetacijos sezoną.

Visi šie aptarti aspektai svarbūs planuojant tiek *in situ* matavimus, tiek palydovinių duomenų panaudojimą. Aukštapelkės tipų pasiskirstymas, subbaseinų ribos, šių erdvinių veiksnių įvertinimas išdėstant vandens matavimo taškus leistų geriau užčiuopti kaitos intervalus ir svyravimų įvairovę. Svarbu žinoti palydovinių ir *in situ* duomenų laikotarpį chronologiniu požiūriu, atsižvelgti į sezoninius ir daugiamečius vandens ciklus ir įvertinti galimą šių sezoninių svyravimų įtaką duomenų tarpusavio ryšiams.

IŠVADOS

Aukštapelkė nėra vientisa teritorija, jai būdinga erdvėje ir laike kintanti hidrologinių rodiklių ir juos bei augalijos būklę atspindinčių spektrinių indeksų įvairovė, kurią būtina įvertinti siekiant reprezentatyvių tyrimo rezultatų. Aukštapelkės buveinės tipas, o ne gretima padėtis yra svarbesnis veiksnys nustatant vandens gylio bei spektrinių indeksų svyravimų panašumus. Tyrimo metu išryškėję spektrinių indeksų reikšmių pasiskirstymo dėsningumai atskiruose aukštapelkės buveinių tipuose leidžia tikėtis, kad aukštos rezoliucijos palydovinių nuotraukų duomenys galėtų būti pritaikomi aukštapelkių kraštovaizdžio raidos tyrimams. Nuotoliniai metodai suteikia svarbios informacijos, leidžiančios apibūdinti pelkių būklę ir jų funkcionavimą. Tai patikima ir erdviškai aiški priemonė, skirta ne tik augalijos struktūrai ir funkcijoms, bet ir ryšiui tarp augalijos ir aukštapelkės vandens režimo įvertinti. Nustatyti ryšiai tarp aukštapelkės vandens gylio, augalijos tipų bei NDVI ir NDWI suteikia galimybę, remiantis spektriniais indeksais, vertinti hidroklimatinių sąlygų kaitą ir jos poveikį aukštapelkių kraštovaizdžiui.

Literatūra

Berg, E. E., Hillman, K. M. D., Dial, R., Deruwe, A. Recent woody invasion of wetlands on the Kenai Peninsula Lowlands, South-Central Alaska: a major regime shift after 18 000 years of wet Sphagnum-sedge peat recruitment. *Canadian Journal of Forest Research,* 2009, no. 39, p. 2 033–2 046. Prieiga internete: https://doi.org/10.1139/X09-121.

Bhatnagar, S., Ghosh, B., Regan, S., Naughton, O., Johnston, P., Gill, L. Monitoring environmental supporting conditions of a raised bog using remote sensing techniques. *Procceedings of International Association of Hydrological Sciences,* 2018, no. 380, p. 9–15. Prieiga internete: https://doi.org/10.5194/PIAHS-380-9-2018.

Bönsel, A., Sonneck, A. G. Development of ombrotrophic raised bogs in North-East Germany 17 years after the adoption of a protective program. *Wetlands Ecology and Management*, 2012, no. 20, p. 503–520. Prieiga internete: https://doi.org/10.1007/S11273-012-9272-4.

Cedro, A., Lamentowicz, M. The last hundred years' dendroecology of Scots pine (*Pinus sylvestris L.*) on a Baltic bog in northern Poland: human impact and hydrological changes. *Baltic Forestry,* 2008, no. 14, p. 26–33.

Čugunovs, M., Nikodemus, O., Dauškane, I., Brūmelis, G. The colonization history of Scots pine (*Pinus sylvestris*) in pristine and drained raised bogs in Latvia. *Environmental and Experimental Biology,* 2016, no. 14, p. 97–106. Prieiga internete: https://doi.org/10.22364/EEB.14.14.

Eamus, D., Zolfaghar, S., Villalobos-Vega, R., Cleverly, J., Huete, A. Groundwater-dependent ecosystems: recent insights from satellite and field-based studies. *Hydrology and Earth System Sciences,* 2015, no. 19, p. 4 229–4 256. Prieiga internete: https://doi.org/10.5194/HESS-19-4229-2015.

Edvardsson, J., Šimanauskienė, R., Taminskas, J., Baužienė, I., Stoffel, M. Increased tree establishment in Lithuanian peat bogs – insights from field and remotely sensed approaches. *Science of the Total Environment,* 2015, no. 505, p. 113–120. Prieiga internete: https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2014.09.078.

Euro+Med. The Euro+Med PlantBase Project – the information resource for Euro-Mediterranean plant diversity [WWW Document], 2006. Prieiga internete: https://ww2.bgbm.org/EuroPlusMed/howtociteus.asp (accessed 10.5.22).

Gao, B. NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment,* 1996, no. 58, p. 257–266. Prieiga internete: https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3.

Hodgetts, N. G., Söderström, L., Blockeel, T. L., Caspari, S., Ignatov, M. S., Konstantinova, N. A., Lockhart, N., Papp, B., Schröck, C., Sim-Sim, M., Bell, D., Bell, N. E., Blom, H. H., Bruggeman-Nannenga, M. A., Brugués, M., Enroth, J., Flatberg, K. I., Garilleti, R., Hedenäs, L., Holyoak, D. T., Hugonnot, V., Kariyawasam, I., Köckinger, H., Kučera, J., Lara, F., Porley, R. D. An annotated checklist of bryophytes of Europe, Macaronesia and Cyprus. *Journal of Bryology,* 2020, no. 42, p. 1–116. Prieiga internete: https://doi.org/10.1080/03736687.2019.1694329.

Howie, S. A., van Meerveld, H. J. Are point measurements in a bog representative of their surrounding area? *Mires and Peat,* 2019, no. 24, p. 1–16. Prieiga internete: https://doi.org/10.19189/MAP.2018.OMB.364.

Jarašius, L., Lygis, V., Sendžikaitė, J., Pakalnis, R. Effect of different hydrological restoration measures in Aukštumala raised bog damaged by peat harvesting activities. *Baltic Forestry,* 2015, no. 21, p. 192–203.

Kibirkštis, G. Čepkelių aukštapelkės paviršinio nuotėkio analizė [Distribution of Čepkeliai moor waterflow]. *Geografija,* 2002, nr. 38, p. 14–17.

Manton, M., Ruffner, C., Kibirkštis, G., Brazaitis, G., Marozas, V., Util, E., Pukien, E. R., Makrickienė, E., Angelstam, P. Fire occurrence in hemi-boreal forests: exploring natural and cultural Scots pine fire regimes using dendrochronology in Lithuania. *Land,* 2022, no. 11 (2), 260 p. (1–25). Prieiga internete: https://doi.org/10.3390/LAND11020260.

Matulevičiūtė, D., Rašomavičius, V. European Habitats and their status in surroundings of Lake Žuvintas. *Ekologija,* 2007, no. 53, p. 6–12.

Rašomavičius, V., Augutis, D., Sinkevičienė, Z., Matulevičiūtė, D., Uselis, V., Gudžinskas, Z. *EB svarbos natūralių ekosistemų inventorizavimo vadovas: buveinių aprašai, būdingos ir tipinės rūšys, jų atpažinimas.* Vilnius: Gamtos tyrimų centras, 2012, 551 p.

Ratcliffe, J. L., Creevy, A., Andersen, R., Zarov, E., Gaffney, P. P. J., Taggart, M. A., Mazei, Y., Tsyganov, A. N., Rowson, J. G., Lapshina, E. D., Payne, R. J. Ecological and environmental transition across the forested-to-open

bog ecotone in a West Siberian peatland. *Science of the Total Environment,* 2017, no. 607–608, p. 816–828. Prieiga internete: https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2017.06.276.

Sinyutkina, A. Drainage consequences and self-restoration of drained raised bogs in the South-eastern part of western Siberia: peat accumulation and vegetation dynamics. CATENA, 2021, no. 205, 105464. Prieiga internete: https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2021.105464.

Sinkevičius, S. *Pelkių ekosistemos dabarties biosferoje.* Vilnius: VU leidykla, 2001, 281 p.

Stančikaitė, M., Gedminienė, L., Edvardsson, J., Stoffel, M., Corona, C., Gryguc, G., Uogintas, D., Zinkutė, R., Skuratovič, Ž., Taraškevičius, R. Holocene vegetation and hydroclimatic dynamics in SE Lithuania – Implications from a multi-proxy study of the Čepkeliai bog. *Quaternary International,* 2019, no. 501, p. 219–239. Prieiga internete: https://doi.org/10.1016/J.QUAINT.2017.08.039.

Stončius, D., Jankauskaitė, M., Stoškus, A., Raščius, G., Kitnaes, K., Kryžanauskas, A., Klimavičius, J., Monsevičius, V., Grigaitė, O., Kibirkštis, G., Klimavičius, E. *Čepkelių valstybinio gamtinio rezervato tvarkymo planas.* Vilnius, 2004.

Taminskas, J., Linkevičienė, R., Šimanauskienė, R., Jukna, L., Kibirkštis, G., Tamkevičiūtė, M. Climate change and water table fluctuation: implications for raised bog surface variability. *Geomorphology,* 2018, no. 304, p. 40–49. Prieiga internete: https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.12.026.

Tupčiauskaitė, J. *Botanikos mokomoji lauko praktika.* Vilnius: Vilnius universiteto leidykla, 2012, 146 p.

Van Seters, T. E., Price, J. S. Towards a conceptual model of hydrological change on an abandoned cutover bog, Quebec. *Hydrological Processes,* 2002, no. 16, p. 1 965–1 981. Prieiga internete: https://doi.org/10.1002/hyp.396.

SUMMARY

Peatlands are recognized as important landscape elements, that require water-logged conditions for peat-forming plant communities to survive. Changes in water regime, caused by both anthropogenic and climatic processes alter the soil environment and further cause shifts in raised bog landscape. The application of cost-effective remote sensing methods for assessment the status of humidity conditions permits monitoring of a large raised bog area and long periods of time. Therefore, in this study we combined *in-situ* and remote sensing methods to assess ecohydrological diversity over large landscape areas of Čepkeliai raised bog. *In-situ* water table fluctuations were measured in 57 measurement wells, 5 study sites, 2019–2020 growing season. *In-situ* botanical species composition was recognised in three raised bog ecosystem types (bog woodland, semi-open raised bog, and open raised bog ecosystems). Spectral indices (NDVI and NDWI) from Sentinel 2 during 2015–2020 were calculated to evaluate vegetation state and humidity conditions of Čepkeliai raised bog. Statistically significant relationships between vegetation and water table depth in different raised bog ecosystem types was found. The deeper water table prevails in woodland ecosystem (dominated by trees, green mosses, *Rhododenron tomentosum*) and *vice versa* in areas with higher water table open raised bog plants (*Sphagnum* spp.) occupy the surface. Our study detected moderate relations ($r>|0.4|$) between some of the botanical and hydrological indicators and spectral indices therefore the application of high-resolution remote sensing data might be considered as an additional source for raised bog measurements. The changes of vegetation cover and related spectral indices may become hydroclimatic indicators.

6 pav. Čepkelių aukštapelkės kraštovaizdis. Rasos Šimanauskienės nuotr.
Fig. 6. Landscape of Čepkeliai raised bog. Photo by R. Šimanauskienė