

2018 m. spalio 19 d. Nikita Dobrotin Klaipėdos universitete apgynė ekologijos ir aplinkotyros mokslo krypties daktaro disertaciją „Evolution of the Curonian Spit Dunes“ („Kuršių nerijos kopų raida“). Mokslinis vadovas prof. dr. Albertas Bitinas.

Nikita Dobrotin, Vilniaus universiteto Geomokslų institutas

KURŠIŲ NERIJOS KOPŲ RAIDA

Anotacija

Dobrotin N. Kuršių nerijos kopų raida// Geologijos akiračiai. ISSN 1393-0006. 2019, Nr. 1–2, 5–15 p.

Kuršių nerija – į UNESCO sąrašą įraktu kultūrinio kraštovaizdžio vertybė, geologiškai požiūriu iki šiol besiformuojantis darinys, kurį sudaro eolinės nuogulos. Tyrimo tikslas – išnagrinėti Mirusių (Pilkųjų) kopų geologinę sandarą, nustatyti kopų raidos ypatumus holoceno metu, įvertinti esamas hipotezes apie palaidotų dirvožemių formavimo procesus. Darbe naudotas tyrimų kompleksas, susidedantis iš modernių geofizinių ir geochronologinių tyrimo metodų, apėmė geofizinius lauko tyrimus georadaru (GPR), eolinių smėlių magnetinio imlumo matavimus, paleo-dirvožemių datavimą radiokarboniniu (^{14}C) metodu ir eolinių smėlių absoliutaus amžiaus nustatymą optiškai stimuliuotos liuminescencijos (IR-OSL) metodu. Detali surinktų duomenų analizė palaiko vieno ilgo dirvodaros proceso modelį. Sudarytos paleogeografinės rekonstrukcijos, atkuriančios skirtingais laikotarpiais buvusį kopų reljefą.

Abstract

Dobrotin N. Evolution of the Curonian Spit Dunes//Geologijos akiračiai. ISSN 1393-0006. 2019, Nr. 1–2, pp. 5–15.

Curonian Spit is included into the UNESCO list of cultural heritage monuments. From the geological point of view, it is still an “alive” environment dominated by aeolian deposits. Detailed investigations of the Dead (Grey) Dunes massif using ground-penetrating radar (GPR) and magnetic susceptibility (MS) surveys, supported by radiocarbon (^{14}C) chronological framework of paleosols and infrared optically stimulated luminescence (IR-OSL) ages of sand horizons, have advanced understanding of aeolian landscape evolution. The detailed analysis of the received data supported the idea of only one long continuous period of permanent formation of palaeosols. GPR surveys enabled a series of paleogeographic reconstructions of the massif for different time intervals of its evolutionary history.

Raktiniai žodžiai: Kuršių nerija, paleo-dirvožemis, georadaras, radiokarboninis (^{14}C) datavimas, IR-OSL datavimas, Holocenas, Mirusios (Pilkosios) kopos.

Keywords: Curonian Spit, palaeosol, ground penetrating radar (GPR), radiocarbon (^{14}C) dating, IR-OSL dating, Holocene, Dead (Grey) Dunes.

Received 16 November 2018, accepted 10 December 2018

Nikita Dobrotin. Vilnius Universitetas, Geomokslų institutas. Čiurliono 21/27, LT-03101 Vilnius, Lithuania, e-mail: ndo@geobaltic.lt

ĮVADAS

Kuršių nerija yra vienas unikaliausių Lietuvos kampelių tiek kultūrine, tiek geologine prasme. Geologiniu požiūriu tai „gyvas“, iki šiol besiformuojantis darinys, kurį sudaro eolinės (vėjo sunešamos) nuogulos. Nors Kuršių nerijoje buvo atlikta daug mokslinių tyrimų, iki šiol nėra galutinai aiški šio pusiasalio geologinio vystymosi raida. Didelė dalis nerijos susiformavo intensyviai veikiant eoliniams procesams. XVI–XIX a., iškirtus miškus, smėlis užpustė 14 kaimų. XIX a., siekiant apsaugoti nuo užpustymo žvejų gyvenvietes, Kuršių nerija buvo apželdinta. Tuo pat metu palei visą nerijos jūros krantą pradėtas kurti apsauginis kopagūbris. Mirusių (Pilkųjų) kopų masyvas, esantis tarp Juodkrantės ir Pervalkos, iki šiol išlaikė savo pirmąjį kraštovaizdį, nėra padengtas augalija ir gali būti naudojamas kaip natūrali eolinių procesų laboratorija. Čia, vykstant smėlio išpustymo (defliacijos) procesui, žemės paviršiuje atsidenia paleodirvožemiai, kurie liudija buvus aktyvių ir pasyvių (stabilių) kopų formavimosi laikotarpių (fazių) kaitą. Ramius tarpsnius, kuomet kopų paviršių padengdavo augmenija ir susiformuodavo dirvožemio sluoksnis, periodiškai keisdavo eolinio aktyvumo laikotarpiai, kurių metu dirvožemiai buvo suardomi arba padengiami naujai supustomo smėlio sluoksniu. Priežastys, lėmusios periodinį fazių aktyvumą (galimi klimato pokyčiai,

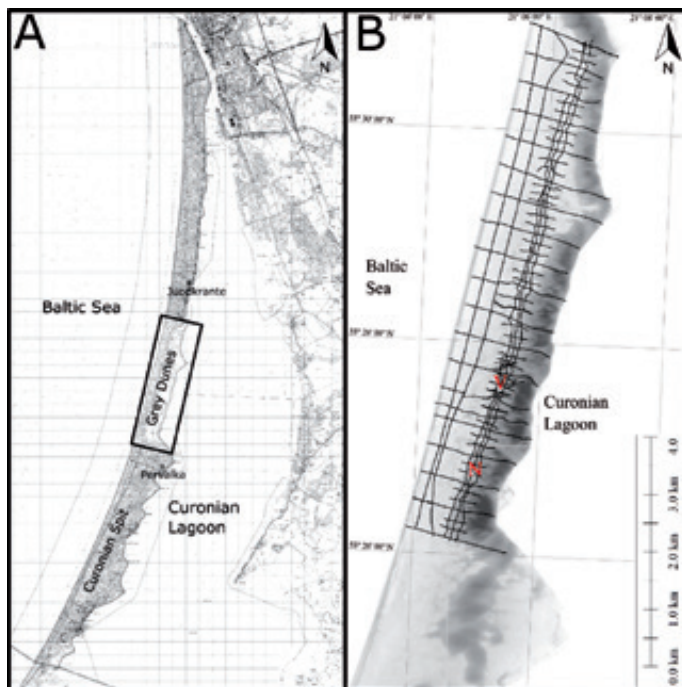
natūralūs ar žmogaus veiklos sukelti gaisrai ir kt.), iki šiol yra diskusijų objektu. Informacija apie Kuršių nerijos geologinį vystymąsi ir vėjo dinamiką turi ne tik mokslinę vertę, bet ir praktinį pritaikymą plėtojant miesto infrastruktūrą, vertinant marių pakrančių stabilumą, nustatant saugomų teritorijų ribas, kuriant turistinius maršrutus, reguliuojant turistų srautus ir kt.

Tyrimo tikslas buvo išnagrinėti Kuršių nerijos kopų geologinę sandarą, nustatyti kopų raidos ypatumus bei tai lėmusius veiksnius holoceno metu, įvertinti esamas hipotezes apie palaidotų dirvožemių formavimo procesus. Tyrimo objektu buvo pasirinktos Mirusios (Pilkosios) kopos, esančios Kuršių nerijoje tarp Juodkrantės ir Pervalkos (1 pav., A).

Kuršių nerija yra ekologiškai jautri vieta su nemažai saugomų teritorijų. Dėl to, tiriant Kuršių nerijos geologinę sandarą bei čia vykstančius procesus, ne visus tradicinius geologinius lauko tyrimų metodus buvo galima naudoti. Darbe naudotas tyrimų kompleksas, susidedantis iš modernių neinvazinių geofizinių ir geochronologinių

1 pav. Tyrimų ploto Kuršių nerijoje planas (A); georadaro profilių tinklelis (B); raidėmis V ir N pažymėtos detalios tyrimo vietos.

Fig. 1. Location of the study area (A). GPR profiles grid (B). Red letters (V and N) indicates sites of detailed investigations.



tyrimo metodų, apėmė geofizinius lauko tyrimus georadaru (GPR), LIDAR duomenų naudojimą, paleodirvožemių datavimą radiokarboniniu (^{14}C) metodu bei eolinių smėlių absoliutaus amžiaus nustatymą optškai stimuliuotos liuminescencijos (IR-OSL) metodu, kopų reljefo įvairiais praeities laikotarpiais rekonstravimą. Pasitelkus naujausias šiuolaikines technologijas, galima itin tiksliai fiksuoti paleodirvožemių reljefą neatliekant kasimo darbų, kas yra svarbu saugomose teritorijose.

TYRIMŲ METODIKA

Kopų tyrimas georadaru. Kopų tyrimai buvo atliekami „RADAR Systems“ georadaru „Zond 12-e“. Matavimams buvo naudojama 300 MHz antena; tyrimams atlikti buvo naudojamas 500 ns langas; pagal bandomuosius gręžinius nustatyta smėlio santykinė dielektrinė skvarba $\epsilon_r = 5,33$ (Dobrotin ir kt., 2013).

Tiriamasis plotas buvo padengtas georadaro profilių tinklu – matavimų profiliai buvo išdėstyti apytiksliai kas 500 m (1 pav., B). Atlikus gautų duomenų apdorojimą, buvo išskirti plotai, kuriuose aptinkama paleodirvožemių. Jie vėliau buvo padengti tankesniu georadaro profilių tinkleliu. Darbų metu georadaro profiliais padengtas beveik 15 km² plotas.

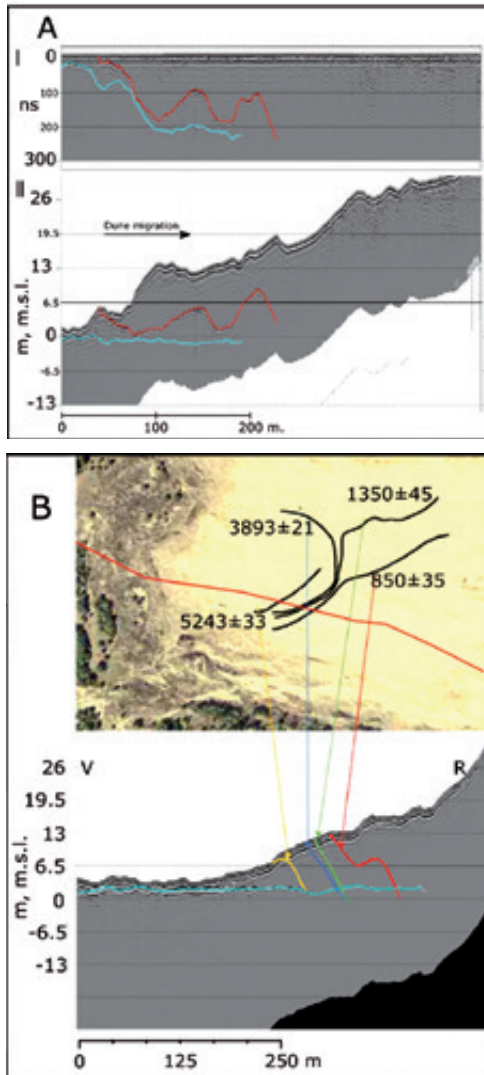
Magnetinis imlumas. Magnetinio imlumo (MS) matavimai buvo atliekami *in situ*, šalia georadaro profilių. Tyrimui buvo naudotas matuoklis *Bartington MS3* su jutikliu *MS2K* (Buynevich ir kt., 2007; Bitinas ir kt., 2018). Magnetinis imlumas buvo matuojamas kas 30 cm. Vietose, kur matyti akivaizdus litologinis skirtumas (pavyzdžiui, sunkiųjų mineralų koncentracija, paleodirvožemiai), buvo atliekami papildomi matavimai. Tai leido tiesiogiai palyginti tam tikro sluoksnio magnetines savybes su jų elektromagnetinio signalo atsaku georadaro duomenyse.

Datavimas. Palaidotų dirvožemių amžiui nustatyti buvo paimta 13 mėginių da-

tavimui radiokarboniniu (^{14}C) metodu. Mėginiai paimti iš vizualiai matomų skirtingų paleodirvožemių sluoksnių kopų šlaituose, paleodirvožemius pasiekus perkasoje ir panaudojus rankinio gręžimo priemones. Visi paimti mėginiai datuoti Gamtos tyrimų centro Geologijos ir geografijos instituto Radioizotopinių tyrimų laboratorijoje (laboratorijos vadovas prof. hab. dr. Jonas Mažeika). Nustatytas paleodirvožemių mėginių radiokarboninis amžius buvo perskačiuotas į kalendorinį amžių naudojant ^{14}C kalibracinę programą *OxCal v. 3.1* (Bronk, Ramsey, 2001) ir kalibracinę kreivę *IntCal09* (Reimer ir kt., 2009).

Eolinių nuogulų amžiui bei jų sedimentacijos greičiui nustatyti skirtingais holoceno laikotarpiais buvo paimti smėlio mėginiai datavimui optškai stimuliuotos liuminescencijos (OSL) metodu – naudota metodo modifikacija IR-OSL, t.y. kai liuminescencijai sužadinti naudojamas infraraudonųjų spindulių (IR – *infrared*) šaltinis. Analizei buvo paimta po 5 mėginius dviejuose profiliuose, statmenuose skirtingo amžiaus palaidotų dirvožemių horizontams. Mėginiai paimti kasiniuose iš 0,5–0,7 m gylio. Smėlių absoliutaus amžiaus nustatymas OSL metodu atliktas Talino technologijos universiteto Geologijos instituto Kvartero geochronologijos laboratorijoje (laboratorijos vadovas dr. Anatoly Molodkov). Datavimo OSL metodu aprašymas pateiktas specialiose publikacijose (Molodkov, Bitinas, 2006; Molodkov ir kt., 2010; Hilgers, 2007; Preusser ir kt., 2008).

Georadaro duomenų interpretavimas ir paleogeografinės rekonstrukcijos. Interpretuojant gautus duomenis, labai svarbu įvesti pataisas pagal dabartinį kopų reljefą, – tam buvo naudojami LIDAR nuotraukos duomenys. Įvedus minėtas korektūras, buvo identifikuojamas gruntinio vandens horizontas ir kiti ryškiausi atspindintys horizontai (paleodirvožemiai, sunkiųjų mineralų sancaupos ir kt.). Gruntinio vandens horizontas visame tiriamame plote išsilaiško apytiksliai tame pačiame gylyje, todėl



gautus duomenis buvo lengviau interpretuoti. Neapdorotų georadaro duomenų pavyzdys su išskirtais atspindžių horizontais bei tie patys duomenys, tik jau su atlikta aukščio korekcija, pateikti 2 paveiksle (A): žydra spalva pavaizduotas gruntinio vandens horizontas, raudona – aptiktas paleodirvožemis. Tyrimų georadaro duomenys parodė, kad kai kuriose vietose paleodirvožemio paviršius kerta gruntinio vandens paviršius. Tokios vietos interpretuotos kaip buvusi ankstesnė Didžiojo kopagūbrio rytinio šlaito papėdė (2 pav., B).

2 pav. Georadaro duomenų interpretacija: pirminiai duomenys (A, I), duomenys su aukščio korekcija (A, II), žydra linija – gruntinio vandens horizontas, raudona linija – aptiktas paleodirvožemis (Dobrotin ir kt., 2013); paleogeografinės rekonstrukcijos: rytinio kopų šlaito nustatymas (B), žydra linija – gruntinio vandens horizontas, geltona linija – paleodirvožemis, datuotas 5243 ± 33 metų PD, mėlyna linija – paleodirvožemis, datuotas 3893 ± 21 metų PD, žalia linija – paleodirvožemis, datuotas 1350 ± 45 metų PD, raudona linija – paleodirvožemis, datuotas 850 ± 35 metų PD (Dobrotin, 2018).

Fig. 2. Interpretation of GPR data (A) (vertical scale – in nanoseconds; $100 \text{ ns} = 6.5 \text{ meters}$; wave refractive index $n = 5.33$), and the same profile with altitudes corrected (B). The groundwater table is indicated by light blue line, the buried palaeosol – by red line (Dobrotin et al., 2013). Palaeogeographic reconstructions of palaeodune massif eastern base. Light blue line indicates the groundwater table, yellow line – 5243 ± 33 cal. years BP; blue line – 3893 ± 25 cal. years BP; green line – 1350 ± 45 cal. years BP; red line – 850 ± 35 cal. years BP.

Eolinės paleodinamikos vertinimas.

Detalaus tyrimo plotai pasirinkti vietose, kur atsidengia keli skirtingo amžiaus paleodirvožemiai (žr. 1 pav., B), datuoti ankstesnių tyrimų metu (Buynevich ir kt., 2007). Detalūs kompleksinius tyrimus sudarė nuosėdų litologinis aprašymas, lauko tyrimai georadaru, smėlio magnetinio imlumo matavimai, smėlio mėginių datavimas IR-OSL metodu. Pasirinktuose plotuose georadaro profilis buvo užrašomas statmenai žemės paviršiuje atsidengiančių paleodirvožemių tįsai. Siekiant atpažinti kuo daugiau atspindžių, georadaro duomenys buvo lyginami su magnetinio imlumo duomenimis. Eolinės sedimentacijos greičiui nustatyti buvo datuojami smėlio mėginiai, paimti tarp gretimų paleodirvožemių (Bitinas ir kt., 2018).

REZULTATAI

Paleodirvožemių amžius ir išplitimas.

Datuotų paleodirvožemių 13 mėginių paėmimo vietų altitudės kinta nuo 9 m iki

1 lentelė. Radiokarboninio (^{14}C) datavimo duomenys. / Table 1. Results of radiocarbon (^{14}C) dating.

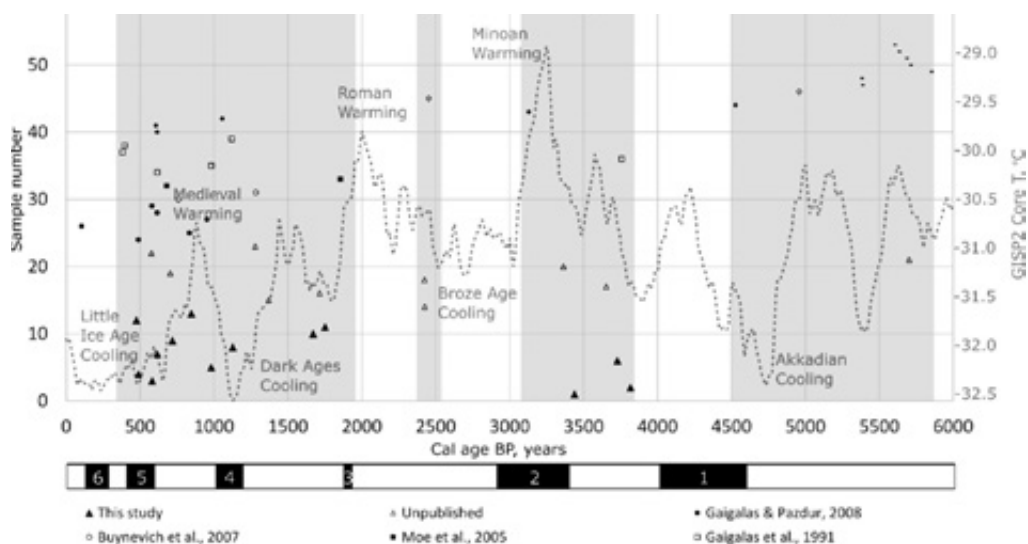
Koordinatės	Aukštis, m	Mėginio informacija	Datuota medžiaga	^{14}C amžius, metai (PD) ($\pm 1\sigma$)	Kalibruotas amžius (1σ)
Vingis dune	10,7	“Oldest” palaeosol	humusas	3180 \pm 120	3560–3316 PD (59,2%) 3310–3262 PD (9,0%)
55° 26' 42" 21° 04' 53"	11,1	Palaeosol-1	humusas	3545 \pm 70	3913–3720 PD (68,2%)
55° 26' 55" 21° 04' 55"	11,1	Palaeosol-2	anglis	675 \pm 70	606–556 PD (36,9%) 668–624 PD (31,3%)
55° 26' 28" 21° 04' 56"	26,8	Palaeosol, G	medis	420 \pm 40	518–459 PD (63,1%) 348–340 PD (5,1%)
55° 26' 35" 21° 04' 48"	13,6	Palaeosol, K	anglis	1055 \pm 195	1174–788 PD (68,2%)
55° 26' 29" 21° 04' 45"	10,1	Palaeosol, F	anglis	3455 \pm 60	3778–3678 PD (40,5%) 3828–3788 PD (16,5%) 3669–3640PD (11,3%)
55° 27' 40" 21° 05' 31"	33	Atodanga Nr.13	medis	605 \pm 50	648–584 PD (54,2%) 568 550 PD (14,0%)
55° 26' 31" 21° 04' 49"	18,1	Palaeosol, I	anglis	1225 \pm 60	1184–1070 PD (52,0%) 1240–1204 PD (16,2%)
55° 26' 24" 21° 04' 42"	16,71	Palaeosol, D	anglis	765 \pm 110	796–640 PD (60,4%) 590–564 PD (7,0%) 891–887 PD (0,9%)
55° 26' 09" 21° 04' 42"	9,6	B2, gylis 1,7 m	humusas	1735 \pm 150	1826–1516 PD (63,3%) 1458–1442 PD (2,3%) 1860–1850 PD (1,4%)
55° 26' 53" 21° 05' 02"	23,9	Palaeosol, N	humusas	1785 \pm 80	1818–1684 PD (46,6%) 1678–1615 PD (21,6%)
55° 27' 49" 21° 05' 32"	17,1	B10, gylis 0,6 m	humusas	410 \pm 95	523–426PD (41,4%) 392–319 PD (26,8%)
55° 27' 41" 21° 05' 22"	15,9	Palaeosol, V	humusas	930 \pm 90	927–765 PD (68,2%)

33 m virš dabartinio jūros lygio (šio datavimo duomenys pateikti 1 lentelėje). Atlikus datavimus paaiškėjo, kad 6 paleodirvožėmių amžius patenka į 400–900 metų prieš dabartį (PD) intervalą, 4 mėginiai – į 1000–2000 metų PD intervalą, dar 3 mėginiai – į 3400–3900 metų PD intervalą.

Paleodirvožėmių amžius ir genezės interpretacija. Be tyrimo metu datuotų 13 mėginių, literatūroje buvo rasta dar 40 Kuršių nerijos dirvožėmių datų (Dobrotin ir kt., 2013). Visų Kuršių nerijoje datuotų paleodirvožėmių kompleksinė analizė leido išskirti 4 paleodirvožėmių formavimosi periodus (generacijas): *prieš 5800–4500 metų PD; *prieš 3900–3100 metų PD; *prieš 2600–2400 metų PD ir *nuo 1900–

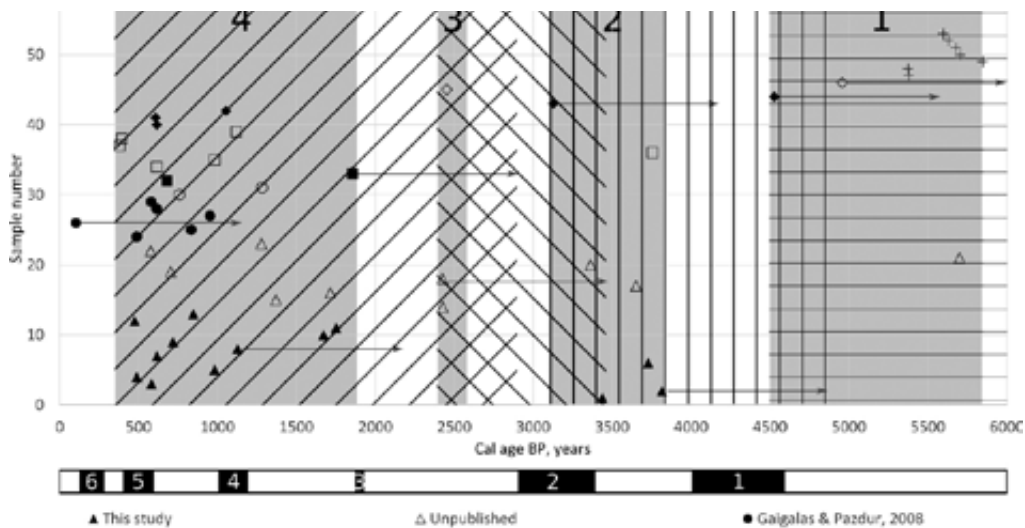
400 metų PD (3 pav.). Išskirtos dirvožėmių generacijos skiriasi nuo A. Gaigalo ir A. Pazdur (2008) išskirtų generacijų, nes šio tyrimo metu buvo naudota didesnė radiokarboninių datavimų duomenų imtis.

Išskirtas paleodirvožėmių generacijas pabandyta susieti su pasaulinės oro temperatūros kaita holoceno metu. Buvo analizuojama hipotezė, kad eolinių procesų reaktyvacija holoceno viduryje gali būti susijusi su globaliu temperatūros pokyčiu tuo metu. Gauti duomenys sugretinti su globalia temperatūros kreive GISP2 (Alley, 2004). Nustatyta, kad nėra ryšio tarp išskirtų paleodirvožėmių formavimosi generacijų ir globalaus atšilimo bei atšalimo laikotarpių.



3 pav. Radiokarboninio (^{14}C) paleodirvožėmių datavimo palyginimas su globalios temperatūros kreive GISP2: X ašyje – metai (PD); Y ašyje kairėje – datuoto mėginio numeris (Dobrotin ir kt., 2013), dešinėje – GISP2 temperatūra; pilkos sekcijos rodo išskirtas paleodirvožėmių generacijas; punktyrinė linija – globalios temperatūros kreivė GISP2 (Alley, 2004); juosta apačioje – A. Gaigalo ir A. Pazdur (2008) išskirtos generacijos.

Fig. 3. Comparison of the GISP2 core global temperature curve with the results of radiocarbon (^{14}C) dating of palaeosols age. X-axis represents age BP, the number in the Y-axis (left) corresponds to the number of sample (Dobrotin *et al.*, 2013), the number in the Y-axis (right) – GISP2 core temperature. Established soil-forming generations are marked as grey sections; soil-forming generations established by Gaigalas and Pazdur (2008) are marked by black rectangles below the graph (black dashes).



4 pav. Radiokarboninio (^{14}C) paleodirvožėmių datavimo rezultatai: pilkos sekcijos žymi išskirtas paleodirvožėmių generacijas; rodyklės rodo galimą datuoto paleodirvožėmio formavimosi pradžią; horizontalus štrichavimas – 1-os generacijos ribų praplėtimas; vertikalus štrichavimas – 2-os generacijos ribų praplėtimas; į kairę palinkęs štrichavimas – 3-os generacijos ribų praplėtimas; į dešinę palinkęs štrichavimas – 4-os generacijos ribų praplėtimas.

Fig. 4. Results of radiocarbon (^{14}C) dating of palaeosols in the Curonian Spit. Established soil-forming generations are marked as grey sections. Arrows attached to a few radiocarbon (^{14}C) dates show possible time span extension ("oldering") of palaeosol formation. A horizontal hatch shows the possible extension of 1st generation, vertical hatch shows possible extension of 2nd generation, a forward diagonal hatch shows possible extension of 3rd generation, a backward diagonal hatch shows possible extension of 4th generation.

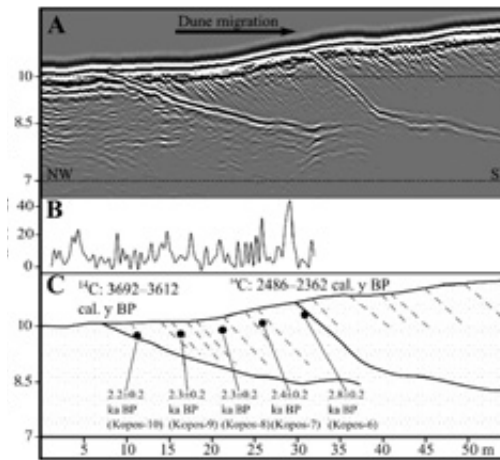
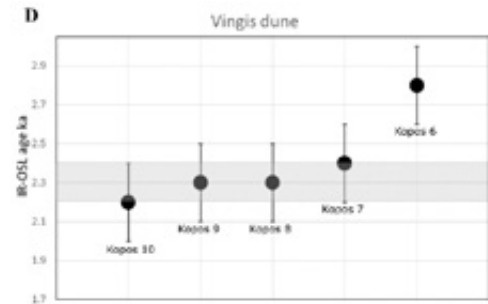


Fig. 5. Profile of detailed investigations in the Vingis dune site: A – georadaro pjūvis; B – magnetinio imlumo anomalijos; C – interpretacija; D – smėlio mėginių IR-OSL datavimas; storos juodos linijos – paleodirvožemiai; brūkšninės linijos – sunkiųjų mineralų koncentracijos sluoksniai; paleodirvožemių radiokarboninio datavimo rezultatai užrašyti virš paleodirvožemių, juodi taškai rodo IR-OSL mėginių paimimo vietas (Bitinas ir kt., 2018).

Pagal ankstesnius tyrimus dirvožemio formavimasis smėlingoje aplinkoje gali trukti net iki 800 metų (Peyart 2007). Priklausomai nuo to, iš kurios dirvožemio dalies paimtas mėginys, amžius tarp viršutinės ir apatinės dirvožemio dalies gali skirtis iki 800 metų. Atsižvelgiant į tai, kad dauguma datavimui skirtų mėginių imama iš viršutinio paleodirvožemio sluoksnio, kuriame randama daugiausia organikos, radiokarboninis datavimas reprezentuoja vėlyviausią dirvožemio vystymosi stadiją. Padarius prielaidą, kad datuotas paleodirvožemis galėjo pradėti vystytis 800 metų anksčiau, nei rodo gautas jo amžius, dirvožemių formavimosi generacijų ribos buvo atitinkamai pakoreguotos. Atsižvelgiant į dirvožemio formavimosi ir datavimo ypatumus, anksčiau išskirtų generacijų ribos buvo praplėstos apie 800 metų (4 pav.), dėl ko visos anksčiau išskirtų paleodirvožemių formavimosi generacijų ribos persidengė. Tai leidžia teigti, kad visos minėtos 4 generacijos gali būti sujungtos į vieną nepertraukiamą paleodirvožemių formavimosi generaciją. Šie rezultatai patvirtina



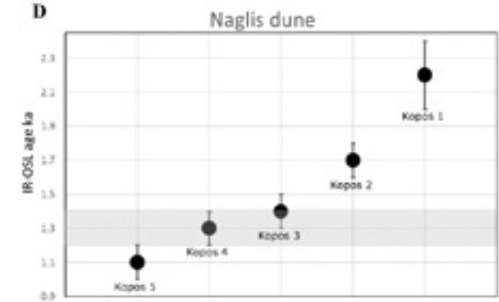
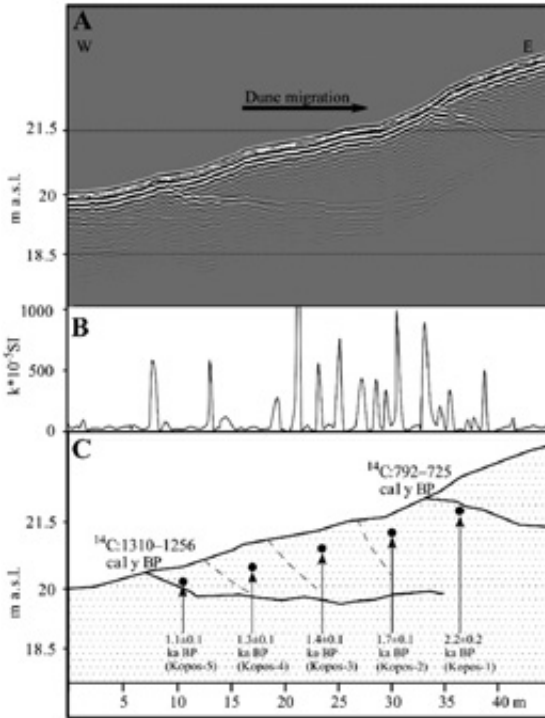
5 pav. Vingio kopos paleodinaminis tyrimas: A – georadaro pjūvis; B – magnetinio imlumo anomalijos; C – interpretacija; D – smėlio mėginių IR-OSL datavimas; storos juodos linijos – paleodirvožemiai; brūkšninės linijos – sunkiųjų mineralų koncentracijos sluoksniai; paleodirvožemių radiokarboninio datavimo rezultatai užrašyti virš paleodirvožemių, juodi taškai rodo IR-OSL mėginių paimimo vietas (Bitinas ir kt., 2018).

V. Gudelio (1998) pateiktą modelį (hipotezę), kad skirtingi palaidoti paleodirvožemiai formavosi vieno ilgo dirvodarinių procesų periodo metu. Tyrimų metu gautas didesnis duomenų kiekis leido minėtą periodą praplėsti nuo 4000 metų PD (Gudelis, 1998) iki 6500–6700 metų PD.

Eolinių procesų paleodinamika. Paleodinamikos tyrimams buvo parinkti du plotai: Vingio kopos poligonas ir Naglio kopos poligonas.

Vingio kopos poligone tyrimų georadaru duomenyse aiškiai matyti du paleodirvožemiai (5 pav.), kurių datuotas amžius yra 3400 ± 35 kal. metų PD ir 2430 ± 25 kal. metų PD. IR-OSL metodu datuotų smėlio mėginių amžius kinta nuo 2200 ± 200 metų PD iki 2800 ± 200 metų PD (KOPOS-6 – KOPOS-10). Georadaro užrašė taip pat matomi silpnėsi atspindžiai, sutampantys su magnetinio imlumo maksimumais, kuriuos sukelia smėlio sluoksniai su didesniu sunkiųjų mineralų kiekiu.

Naglio kopos poligone tyrimo georadaru duomenyse aiškiai išsiskiria du paleodirvožemiai (6 pav.), kurių amžius –



6 pav. Naglio kopos paleodinaminis tyrimas: A –georadaro pjūvis; B – magnetinio imlumo anomalijos; C – interpretacija; D – smėlio mėginių IR-OSL datavimas; storos juodos linijos – paleodirvožemiai; brūkšninės linijos – sunkiųjų mineralų koncentracijos sluoksniai; paleodirvožemių radiokarboninio datavimo rezultatai užrašyti virš paleodirvožemių; juodi taškai rodo IR-OSL mėginių paėmimo vietas (Bitinas ir kt., 2018). Fig. 6. Profile of detailed investigations in the Naglis dune site: A – ground penetrating radar (GPR) image (radarogram), B – curve of magnetic susceptibility (MS), C – interpretation of radarogram, D – results of IR-OSL dating from the site of the Vingis dunes. In the latter section palaeosols are marked by solid lines, interlayers with high concentration of heavy minerals – by dashed lines; radiocarbon age of the palaeosols is indicated above the surface identifying line. Sampling locations for IR-OSL dating is indicated by black dots (Bitinas et al., 2018).

1350±45 kal. metų PD ir 850±35 kal. metų PD. Tarp dirvožemio sluoksnių esančio ir IR-OSL metodu datuoto smėlio amžius kinta nuo 1100±100 metų iki 2200±200 metų (5 pav., KOPOS-1–KOPOS-5). Kaip ir pirmu atveju, georadaro užrašė išsiskiriantys silpnėsi atspindžiai sutampa su magnetinio imlumo maksimumais, kuriuos sukėlė smėlio sluoksniai su didesne sunkiųjų mineralų koncentracija.

Anomalios datos (KOPOS-6 Vingio kopoje, KOPOS-1 ir KOPOS-2 Naglio kopoje) iškrepta iš konteksto, todėl jauniausių smėlių datos „pasendinamos“. Taip gali nutikti vykstant greitam dalelių perklostymui, kuomet smėlio dalelės nepakankamai ilgai buvo apšviestos, – vyko labai greitas smėlio perklostymas (Wallinga, 2002). Atmetus anomalias datas, datavimo rezultatai rodo, kad smėliai tarp dviejų dirvožemių susiklostė per gana trumpą laiko tarpą, t. y. apytikriai per 200 metų. Šiuos duomenis patvirtina ir nustatytos aukštos kai ku-

rių smėlio sluoksnelių magnetinio imlumo vertės, kurias lemia ypač didelė sunkiųjų mineralų koncentracija sluoksnyje, – tai rodo buvusius intensyvaus eolinio aktyvumo (audringus) periodus.

Paleogeografinės rekonstrukcijos. Paleogeografinės rekonstrukcijos atliktos vienodo amžiaus paleodirvožemių išplitimo plotuose. 7 paveiksle (A) pateikta apytiksliai 1000 metų PD laikotarpio paleogeografinė rekonstrukcija. Kopų masyvas ne vientisas, o sudarytas iš kelių atskirų kopų. Kopų plotis – 200–300 m, aukštis – 35 m.

Kuršių nerijos kopų masyvo rytinio šlaito papėdės persistūmimas per paskutinius 3500 metų pateiktas 7 pav., B. Maždaug prieš 3500 metų kopų masyvo rytinio šlaito papėdė buvo ties centrine nerijos dalimi, o apytikriai prieš 1000 metų PD ši papėdė dar maždaug 180 m buvo persistūmusi rytų kryptimi. Tad per paskutinius 1000 metų Kuršių nerijos kopų masyvo rytinio šlaito papėdė patyrė esminius

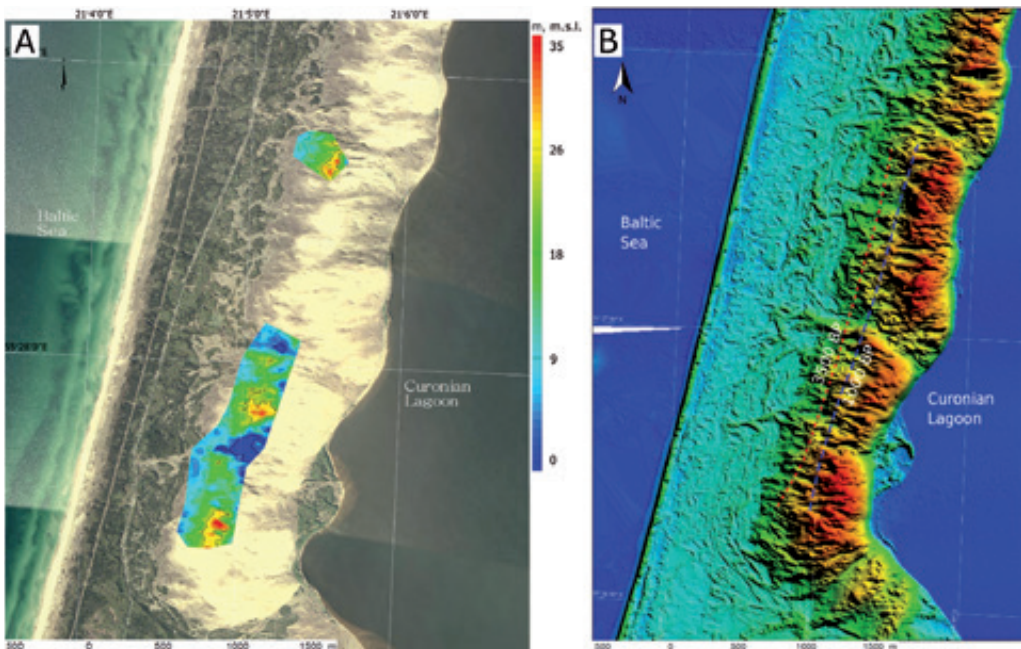
pasikeitimus – buvo perstumta daugiau kaip 500 m į rytus.

REZULTATŲ APTARIMAS

Radiokarboninio (^{14}C) datavimo rezultatai rodo, kad seniausias Kuršių nerijoje aptiktas paleodirvožemis datuojamas 5700 metų PD. Atsižvelgiant į galimą dirvodaros trukmę (apie 800 metų; Peyrat, 2007) galima teigti, kad dirvožemis galėjo pradėti formuotis maždaug prieš 6500 metų. Šie duomenys sutampa su archeologinių tyrimų duomenimis (Rimantienė, 1999; Piličiauskas ir kt., 2011). Laužaviečių turinio ir keramikos datavimai rodo, kad Kuršių nerija jau buvo apgyvendinta prieš 5300–5800 metų PD, tad tuo metu jau turėjo būti pakankamai susiformavęs dirvožemis ir tam tikra augmenija, sudaranti palankias

sąlygas gyvybei vystytis. Radiokarboninio (^{14}C) datavimo rezultatai patvirtina V. Gudelio (1998) vieno ilgai trukusio dirvodaros proceso modelį. Paleodirvožemių radiokarboninių datavimų gausa leido praplėsti šį dirvodaros periodą nuo 4000 metų PD iki 6500–6700 metų PD.

Sluoksniai su didesne sunkiųjų mineralų koncentracija, aptikti Naglio ir Vingio kopų poligonuose, rodo buvus laikotarpį su padidėjusiu pažeminio vėjo greičiu, ir tai gali būti siejama su audromis (Buynevich, 2012; Pupienis ir kt., 2017). Audros galėjo būti pagrindinis veiksnys, lėmęs kopų transgresiją. Tyrimų georadaru duomenys ir magnetinio imlumo matavimų rezultatai rodo, kad eolinėse nuogulose, skiriančiose skirtingo amžiaus paleodirvožemius, yra sluoksnių su didesne sunkiųjų mineralų koncentracija. Didėsnis sunkiųjų mineralų



7 pav. Paleogeografinės rekonstrukcijos: A – kopų masivo paleogeografinės rekonstrukcijos apytiksliai prieš 1000 metų PD, spalvos rodo paleokopos altitudę virš jūros lygio; B – Mirusių (Pilkųjų) kopų masivo rytinio šlaito papėdės persistūmimas per paskutinius 3500 metų; raudona linija – rytinio šlaito papėdės vieta prieš 3 500 metų PD, mėlyna linija – rytinio šlaito papėdės vieta prieš 1000 metų PD.

Fig. 7. Palaeogeographic reconstruction. Palaeogeographic reconstruction of the Dead (Grey) Dunes massif about 1000 calendar years BP (A), Colour indicates palaeosol surface elevation above sea level (m, m.s.l.). Generalized position of the ancient palaeodune massif eastern base in the southern part of the Dead (Grey) Dunes for the last 3500 years (B). A red line represents the palaeodune eastern base 3500 years BP, a blue line – the palaeodune eastern base 1000 years BP.

kiekis nuosėdose gali būti siejamas su paleoklimatinėmis sąlygomis (ramiomis, vėjuotomis ar audringomis) kopų akumuliacijos metu. Tyrimų duomenys rodo, kad kopų reaktivaciją paskatino lokalūs veiksniai (miškų gaisrai, miškų kirtimas ir pan.), ji apėmė nedideles teritorijas, o eolinio suaktyvėjimo periodai tęsdavosi kelis šimtus metų.

Atliktos paleorekonstrukcijos rodo, kad kopų masyvo rytinio šlaito papėdės padėtis iki 1000 metų PD beveik nekito ir buvo ties centrine dabartinės Kuršių nerijos ašimi (t.y. ties dabartinio Didžiojo kopagūbrio vakarinio šlaito papėde). Senosios kopos vienodai dengė visą Kuršių nerijos teritoriją. Didysis kopagūbris susiformavo tik XVI a. dėl destruktivios žmogaus veiklos paskatinto eolinio aktyvumo.

IŠVADOS

Surinktų duomenų detali analizė patvirtina V. Gudelio (1998) vieno ilgai trukusio dirvodaros proceso modelį. Paleodirvo-

žemių radiokarboninių datavimų gausa leido praplėsti šį dirvodaros periodą nuo 4000 metų prieš dabartį (PD) iki 6500–6700 metų PD.

Atliktos paleorekonstrukcijos rodo, kad kopų masyvo rytinio šlaito papėdės padėtis per pastaruosius 5000 metų beveik nekito ir buvo ties centrine Kuršių nerijos ašimi (ties dabartinio Didžiojo kopagūbrio vakarinio šlaito papėde). Paleorekonstrukcijos byloja, kad laikotarpiu tarp 3500 ir 1000 metų PD kopų masyvo rytinė papėdė pasislinko tik maždaug 180 m, o jau vien per pastaruosius 1000 metų kopos buvo perstumtos daugiau nei 500 m rytų kryptimi.

Tyrimų georadaru duomenys ir smėlių magnetinio imlumo matavimų rezultatai eolinėse nuogulose, skiriančiose skirtingo amžiaus paleodirvožemius, rodo sluoksnis su didesne sunkiųjų mineralų koncentracija. Didesnis sunkiųjų mineralų kiekis gali būti siejamas su paleoklimatinėmis sąlygomis (ramiomis, vėjuotomis ar audringomis) kopų akumuliacijos metu.

LITERATŪRA

- Alley, R.B. GISP2 Ice Core Temperature and Accumulation Data. IGBP PAGES/World Data Center for Palaeoclimatology Data Contribution 2004-013. NOAA/NGDC Palaeoclimatology Program, Boulder CO, USA.
- Bitinas, A., Dobrotin, N., Buynevich, I.V., Molodkov, A., Damušytė, A., Pupienis, D. Coastal dune dynamics along the northern Curonian Spit, Lithuania: toward an integrated database. *Geological Quarterly*, 2018, 62 (3), 553–562.
- Bronk Ramsey, C. Development of the radiocarbon calibration program OxCal. *Radiocarbon*, 2001, 43, 2A, 355–63.
- Buynevich, I.V. Morphologically induced density lag formation on bedforms and biogenic structures in aeolian sands. *Aeolian research*, 2012, 7, 11–15.
- Buynevich, I.V., Bitinas, A., Pupienis, D. Lithological anomalies in a relict coastal dune: Geophysical and palaeoenvironmental markers. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34, L09707.
- Dobrotin, N., Bitinas, A., Michelevičius, D., Damušytė, A., Mažeika, J. Reconstruction of the Dead (Grey) Dunes evolution in the Curonian Spit, Southeastern Baltic. *Bulletin of the Geological Society of Finland*, Vol. 85, 2013, pp 53–64.
- Dobrotin, N. Evolution of Curonian Spit Dunes. Klaipėda University. Ecology and Environmental Sciences. Doctoral Thesis. 2018.
- Gaigalas, A., Pazdur, A. Chronology of buried soils, forest fires and extreme migration of dunes on the Kuršių Nerija spit (Lithuanian coast). *Landform Analysis*, 2008, 9, 187–191.
- Gudelis, V. The Lithuanian offshore and coast of the Baltic Sea. Lithuanian Academy of Sciences Monograph, 1998, Vilnius.
- Hilgers, A. The chronology of Late Glacial and Holocene dune development in the northern Central European lowland reconstructed by optically stimulated luminescence (OSL) dating. Ph.D. thesis, University of Cologne, 2007, 353 pp.

- Molodkov, A., Bitinas, A., Damušytė, A. IR-OSL studies of till and inter-till deposits from the Lithuanian Maritime Region. *Quaternary Geochronology*, 2010, 5, 263–268.
- Molodkov A, Bitinas A. Sedimentary record and luminescence chronology of the Lateglacial and Holocene Aeolian sediments in Lithuania. *Boreas*, 2006, 35, 244 – 254.
- Peyrat, J. Development, properties and classification of dune soils in the Curonian Spit National Park, Russian part. *Geologija*, 2007, 59, 59–64.
- Piličiauskas, G., Lavento, M., Oinonen, M. New 14C Dates of Neolithic and Early Metal Period Ceramics in Lithuania. *Radiocarbon*, 2011.
- Preusser, F., Degering, D., Fuschs, M., Hilgers, A., Kaderet, A., Kalsen, N., Krbetshek, M., Richter, D., Spencer, J. Luminescence dating: basics, methods and applications. *Eiszeitalter und Gegenwart Quaternary Science Journal*, 2008, 57/1-2, 95–149.
- Pupienis, D., Buynевич, I.V., Ryabchuk, D., Jarmalavičius, D., Žilinskas, G., Fedorovič, J., Kovalevac, O., Sergeev, A., Cichon-Pupienis, A. Spatial patterns in heavy-mineral concentrations along the Curonian Spit coast, southeastern Baltic Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2017, 195, 41–50.
- Reimer, P.J., Baillie, M.G.L., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J.W., Blackwell, P.G., Bronk Ramsey, C., Buck, C.E., Burr, G.S., Edwards, R.L., Friedrich, M., Grootes, P.M., Guilderson, T.P., Hajdas, I., Heaton, T.J., Hogg, A.G., Hughen, K.A., Kaiser, K.F., Kromer, B., McCormac, F.G., Manning, S.W., Reimer, R.W., Richards, D.A., Southon, J.R., Talamo, S., Turney, C.S.M., Van der Plicht, J., Weyhenmeyer, C.E. *IntCal09 and Marine09 radiocarbon age calibration curves, 0-50,000 years cal BP*. *Radiocarbon*, 2009, 51, (4), 1111–1150.
- Rimantienė, R. Curonian Spit at a glance of an archaeologist. *Academy of Arts Press*, 1999, Vilnius.
- Wallinga, J. Detection of OSL age overestimation using single-aliquot techniques. *Geochronometria*, 2002, Vol. 21, pp 17-26.

Summary

Detailed investigations of the Dead (Grey) Dunes massif using ground-penetrating radar (GPR) and magnetic susceptibility (MS) surveys, supported by radiocarbon (14C) dating of paleosols and infrared optically stimulated luminescence (IR-OSL) dating of sand horizons, have advanced understanding of aeolian landscape evolution.

The results of the radiocarbon dating of palaeosols range from modern times to 5700 cal. years BP. The detailed analysis of the received data supported the idea of V. Gudelis (1998) – one long continuous period of permanent formation of palaeosols. A bigger amount of radiocarbon (14C) analysis collected during the latest decades enable to extend the beginning of this period from 4000 to 6500-6700 cal. years BP.

The GPR images and magnetic susceptibility trends within aeolian sediments that separate palaeosols of different age demonstrate the variations in heavy-mineral content that can be related to

palaeoclimatic conditions (relatively calm or stormy near-surface regime) that existed during the dune accumulation. The aeolian reactivations were stimulated by the local factors (forest fires and deforestation), covered limited areas, the sand of dunes was dislocated from a few to few tens of meters, and it lasted no longer than for one or two centuries. Anomalous IR-OSL dates could be explained by rapid sand transportation during a relatively stormy period, thereby the “old” IR-OSL signal retained.

According to the palaeo-reconstructions, the eastern base of the former Curonian Spit dunes was at approximately the same position during the last 5000 years, which was near the axial part of the Spit, along the western (windward) slope of the present Great Dune Ridge. The palaeogeographic reconstruction of the eastern base of palaeo-dune massif indicates that over the time span of 2500 years (from 3500 to 1000 years BP) dunes shifted only a few hundred meters (approximately 180 m), whereas over the last 1000 years dunes moved nearly 500 meters.