

KURŠIŲ NERIJOS PRIEKRAANTĖS ZONOS SĖKLIŲ MORFOLOGIJA

Rasa Janušaitė, Laurynas Jukna

Vilniaus universitetas, CHGF Geomokslų institutas,

M. K. Čiurlionio g. 21, LT-03101 Vilnius

El. paštas: rasa.janusaitė@gmail.com; laurynas.jukna@gf.vu.lt

Janušaitė R., Jukna L. MORPHOLOGY OF CURONIAN SPIT NEARSHORE ZONE BARS. *Geografijos metraštis*, 50, 2017.

Abstract. The article analyses morphological features of nearshore bars in the Baltic sea coast of Curonian Spit. Although considerable research on nearshore bars has been done since the middle of 20th century, these geomorphological features are still poorly understood, including the fact that no research tradition on nearshore bars has been formed in Lithuania yet. For this reason, a review of existing bar generation hypotheses and classification of nearshore bars was presented in this article in order to create methodological guidelines for a study of Curonian Spit sandbars. In this study morphological structure of Curonian Spit nearshore bars were evaluated by extracting morphometric parameters of these underwater sand ridges from the nearshore cross-shore profiles. As a result of this analysis morphological bar sectors were presented. It was found that the nearshore of Baltic sea coast in the Curonian Spit is composed of six distinct bar sectors characterized by different bar zone width, number and size of bars. Finally, common bar types in the Curonian Spit were distinguished and their spatial variability was discussed in this article. Two-dimensional longshore, three-dimensional longshore and shore-attached (transverse) bars appeared in the nearshore of Curonian Spit.

References 92, Figs 7, Tables 1. In Lithuanian, summary in English.

Keywords: nearshore bar, nearshore morphology, Curonian Spit, Baltic Sea.

Received: November 2017; accepted: December 2017

Įvadas

Sėkliai – išilgai kranto ištįsusių povandeninių smėlio gūbrių struktūros, formuojamos bangų bei priekrantės srovių ir atsirandančios atvirų ar pusiau uždarytų jūrų, vandenynų ar didelių ežerų krantuose, kur yra pakankamai smėlio atsargų ir dominuoja bangų veikla (Brander 2004; Bird, 2008; Pape, Ruessink, 2008; Ruessink et al., 2013; Price et al., 2014). Tai vienas kaičiausių kranto zonos geomorfologinių elementų, turinčių didelę įtaką smėlio apykaitai tarp priekrantės bei paplūdimio zonų ir stipriai prisidedančių prie priekrantės-paplūdimio geosistemos dinamikos per medžiaginius bei energetinius sistemos srautus. Audrų metu sėkliai silpnina procesų plūsmo zonoje intensyvumą, kas lemia mažesnę paplūdimio ir kopų ardą, taip pat mažina ekonominius nuostolius kranto zonoje (Price et al., 2014; Fernandez-Mora et al., 2015; Dubarbier et al., 2015). Šių darinių morfodinamika lemia bangų transformaciją ir išilginių bei atplaišinių srovių formavimąsi, turi įtakos nešmenų, maisto medžiagų, teršalų pasiskirstymui priekrantės zonoje (Elgar et al., 2001; De Schipper et al., 2014; Castelle et al., 2016).

Mokslinėje literatūroje priekrantės sėklių samprata pirmą kartą suformuluota dar 1845 m. E. de Beaumont'o darbe (Greenwood, Sherman, 1984). Plačiau šiais geomorfologiniais dariniais pradėta domėtis XX a. 5–6 dešimtmečiais pasirodžius Kingo, Wiliamso (1949), Shepardo (1950) darbams. Vėliau prasidėjusi intensyvi sėklių tyrimų

plėtra išryškino dvi pagrindines jų kryptis – sėklių pusiausvyros, dinamikos ir raidos dėsningumą tyrimus. Bendrąja prasme sėklių dinaminės pusiausvyros tyrimai yra orientuoti į skirtingų sėklių tipų formavimąsi ir tam reikalingų hidrodinaminių sąlygų numatymą bei vertinimą (Shepard, 1950; Bowen, Inman, 1971; Greenwood, Davidson-Arnott, 1979; Bowen, 1980; Boczar-Karakiewicz, Davidson-Arnott, 1987; Sallenger, Howd, 1989), tuo tarpu sėklių raidos tyrimuose akcentuojami sėklių padėties kranto atžvilgiu ir morfologinės sąrangos ypatumai. Šiuose tyrimuose skiriami du sėklių raidos modelių tipai: 1) sėklių padėties kaitos skersai kranto, nevertinant sėklių pokyčių išilgai kranto; 2) sėklių formos ir padėties kaitos tiek skersai, tiek išilgai kranto. Pirmuoju atveju analizuojamos sėklių migracijos įkrančiau ir įjūriau kranto linijos ypatybės, daug dėmesio skiriant šių procesų cikliškumui ir sezoniškumui (Larson, Kraus 1992; Ruessink, Kroon, 1994; Gallagher et al., 1998; Shand et al., 1999; Elgar et al., 2001; Kuriyama, 2002; Van Enckevort, Ruessink, 2003a; Hoefel, Elgar, 2003; Hsu et al., 2006; Marino-Tapia et al., 2007; Ruessink et al., 2009; Walstra et al., 2012; Fernandez-Mora, 2015; Kim et al., 2017). Antruoju – kuriami morfodinaminiai kranto zonos modeliai, išskiriant jos būsenas, apibūdinančias kranto raidos seką, siejamą su konkrečiomis bangavimo sąlygomis (Short, 1979; Wright, Short, 1984; Lippmann, Holman, 1990; Aagaard, 1991; Short, 1992; Short, Aagaard, 1993; Masselink, Short, 1993). Pastaraisiais metais neretai nutolstama nuo šių tyrimų krypčių, o dėmesys koncentruojamas į sėklių morfologijos ir hidrodinaminių procesų sąveiką (Smit et al., 2010; Smit et al., 2012; Cohn et al., 2014), sėklių morfologinį „poravimąsi“ (Castelle et al., 2010; Van de Lageweg et al., 2013; Price et al., 2014).

Lietuvos Baltijos jūros kranto zonos tyrimai apima keletą krypčių: kranto linijos trumpalaikės ir ilgalaikės dinamikos (Žilinskas, 2005; Jarmalavičius ir kt., 2011; Bagdanavičūtė ir kt., 2012; Jarmalavičius ir kt., 2014) analizę ir erozinių bei akumuliacinių procesų modeliavimą (Mėžinė ir kt., 2013), visos kranto zonos morfologinių ir morfometrinių ypatybių, priklausomai nuo vyraujančio nešmenų pernašos proceso (Žaromskis, Gulbinskas, 2010), ar jų tarpusavio priklausomybės (Jarmalavičius, 2012) vertinimą ir priekrantės zonos reljefo bei jai būdingų procesų nagrinėjimą. Pastarieji tyrimai dažniausiai aprėpia priekrantės ir jai būdingų reljefo formų (sėklių ir tarpėklių) morfometrinių parametrų analizę (Žaromskis, 1974; Kirklys, 1974; Žaromskis, 2004) ar jų tarpusavio ryšio vertinimą (Žilinskas, Jarmalavičius, 2007). Yra bandymų analizuoti ir morfodinaminis procesus povandeniniame šlaite (Gelumbauskaitė, 2003). Vis dėlto dažniausiai minėtuose darbuose priekrantės sėkliai analizuojami tik kaip vienas iš kranto zonos elementų, detalesnės Lietuvos pajūrio sėklių struktūros (ypač tipologinės) ir dinamikos analizės darbų trūksta.

Iš esmės tiek pasaulio, tiek Lietuvos moksliniai tyrimai rodo, kad sėklių buvimas kompleksiškos priekrantės morfodinaminės sistemos, kurioje tarp nešmenų, hidrodinaminių procesų ir besiformuojančių morfologinių elementų egzistuoja sudėtingi grįžtamieji ryšiai, dalimi (Plant et al., 2001) ir sėklių lauko matavimo duomenų trūkumas, sąlygotas sudėtingo bei brangaus tokių duomenų rinkimo, lemia tai, jog procesai, veikiantys sėklių genezę ir dinamiką bei sėklių įvairovę, jų morfologinę struktūrą, iki šiol nėra visiškai ištirti (Di Leonardo, Ruggiero, 2015). Todėl šio darbo tikslas: bendrąja prasme – prisidėti prie Lietuvos teritorijos priekrantės sėklių tyrimų, siaurąja prasme – įvertinti ir išnagrinėti Kuršių nerijos Baltijos jūros priekrantės sėklių morfometrines bei tipologines struktūras, kas sudarytų prielaidas tolesniems priekrantės hidrodinaminių ir morfodinaminių procesų tyrimams.

1. Metodika

Darbe analizuojama 51 km ilgio Lietuvai priklausanti akumuliacinės Kuršių nerijos priekrantės atkarpa. Teritorijai būdingos akumuliacinės formos – sėkliai ir tarpinė sėkliai, kurių zonos plotis varijuoja nuo 305 iki 720 m, taip pat ryškūs sezoniniai bangų ir vėjo režimo skirtumai (Jakimavičius ir kt., 2017).

Tiek minimos teritorijos, tiek bendrąja prasme priekrantės sėklių morfologinei analizei atlikti būtina išanalizuoti ir apžvelgti egzistuojančius sėklių formavimosi, jų susidarymo modelius ir hipotezes, kas padėtų suvokti sėklių formavimąsi lemiančius procesus ir paaiškinti susidariusių Kuršių nerijos sėklių morfologinius ypatumus. Atliekant sėklių morfologinę analizę, kritiškai svarbu išanalizuoti ir sėklių tipizavimo problemą, taip pat korektiškai parinkti metodus bei duomenis pačiai analizei atlikti.

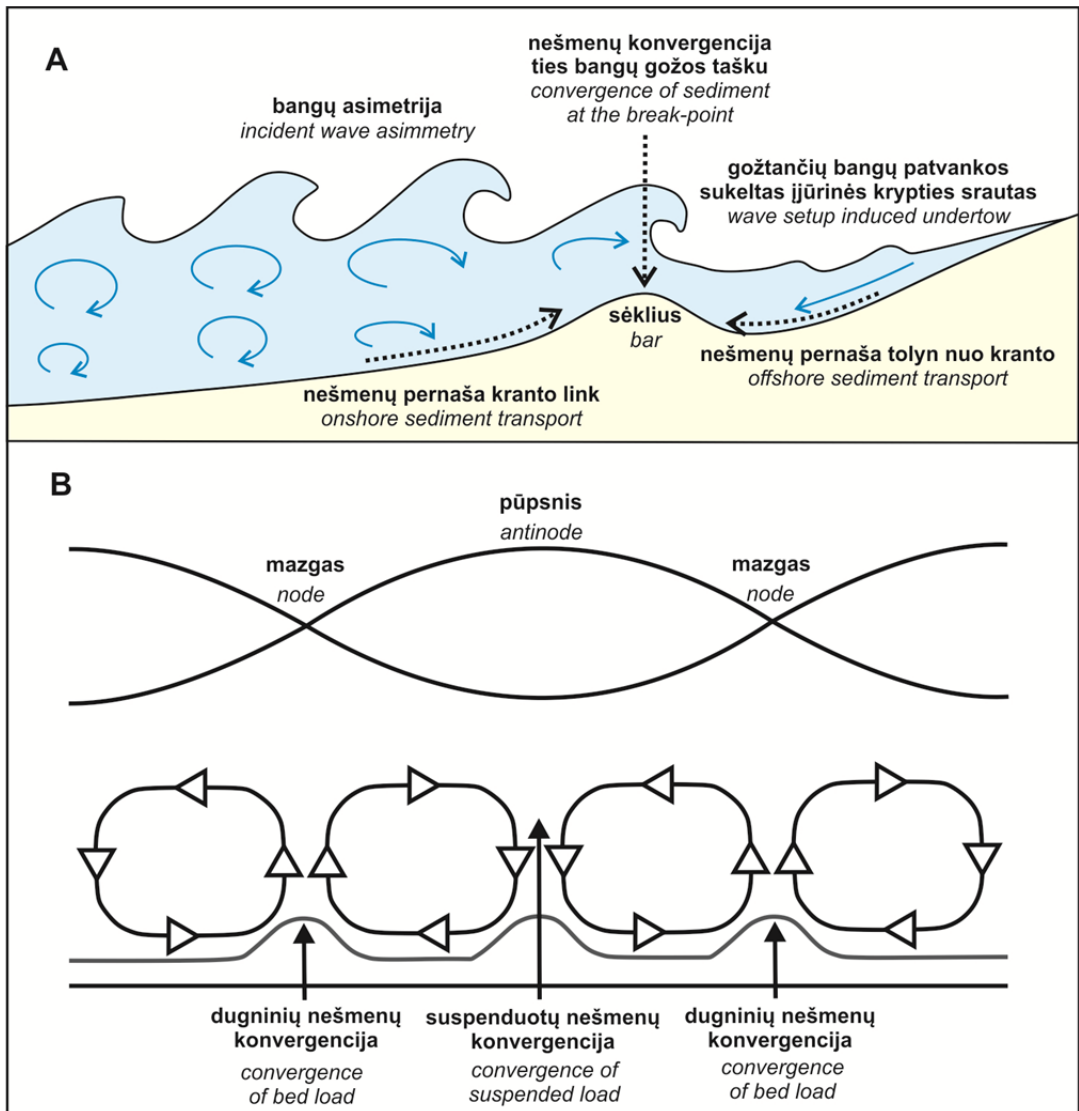
1.1. Priekrantės sėklių susidarymo problema

Sėklių formavimasis nėra visiškai pažintas ir suprastas procesas, iki šiol nėra vieningos nuomonės, kokie mechanizmai lemia jų susidarymą, tačiau visos egzistuojančios sėklių susidarymo hipotezės yra susijusios su nešmenų konvergencija. Mokslinėje literatūroje skiriamos trys sėklių formavimąsi aiškinančios hipotezių grupės: gožos taško, infragravitacinių bangų ir saviorganizacijos (Wijnberg, Kroon, 2002; Greenwood, 2005; Davidson-Arnott, 2010).

Gožos taško hipotezių atstovai teigia, kad sėkliai formuojasi ties bangų gožos tašku (King, Williams, 1949; Dyhr-Nielsen, Sørensen, 1970; Dally, Dean, 1984; Sallenger, Howd, 1989; Thornton et al., 1996). Ankstyvuosiuose gožos taško modeliuose sėklių genezė siejama su neriančio ir slystančio gožos tipo bangomis. Sėklių suformuojantys nešmenų srautai yra pernešami į jūrą cilindro arba spiralės formos sūkuriu, išgraužiančio tarpinė sėklių po gožtančiomis bangomis (Brander, 2004; Greenwood, 2005). Vėlesnėse gožos taško hipotezėse akcentuojama nešmenų konvergencija ties bangų gožos tašku (1 pav. A), kai bangų asimetrija į jūrą gožos zonos nulemia įkrintinės krypties nešmenų srauto susiformavimą, o bangų patvanka gožos zonoje suformuoja įjūrinės krypties nešmenų srautą, kuris gali transportuoti nešmenis palei jūros dugną ir sulėtėja ties bangų gožos tašku. To rezultatas – arda įkrančiau konvergencijos zonos, kur susiformuoja tarpinė sėklis, ir akumuliacija konvergencijos zonoje ties bangų gožos tašku (Greenwood, 2005; Davidson-Arnott, 2010). Remiantis šia hipoteze, keliagubas sėklius formuojasi tada, kai bangos gožta kelis kartus (Wijnberg, Kroon, 2002). Nors šios hipotezės suformuluotos atliekant eksperimentus dirbtiniuose vandens baseinuose, tačiau jas patvirtina ir lauko tyrimai (Agaard et al., 2008). Pagrindinis gožos taško hipotezių trūkumas – jos paaiškina tik dviejų dimensijų sėklių genezę, tačiau nepaaiškina, kaip susiformuoja trijų dimensijų formos.

Infragravitacinių bangų hipotezės. Infragravitacinės bangos sukelia konvergencinio pobūdžio nešmenų judėjimą, kuris lemia sėklių formavimąsi. Sėkliai formuojasi po pakraštinių bangų arba stovinčių „nutekančių“ bangų mazgais ar pūpsniais, priklausomai nuo nešmenų pernašos tipo (1 pav. B). Suspenduoti nešmenys yra konverguojami ties stovinčios bangos pūpsniais, o dugniniai – ties mazgais (Bowen, 1980; Brander, 2004; Greenwood, 2005; Davidson-Arnott, 2010). „Nutekančioms“ ir progresuojančioms pakraštinioms bangoms nebūdingi nešmenų pernašos skirtumai išilgai kranto, todėl jos lemia dviejų dimensijų (tiesių) sėklių formavimąsi (Agaard, 1991), savo ruožtu trijų

dimensijų sėklių genezei reikalingos stovinčios pakraštinės bangos (Bowen, Inman, 1971; Bowen, 1980; Sallenger, Holman, 1987; Aagard, 1991; Wijnberg, Kroon, 2002; Davidson-Arnott, 2010). Keliagubas sėklius formuojasi esant keliems mazgams ir pūpsniams skersai kranto (Aagard, 1991; Wijnberg, Kroon, 2002).



1 pav. Sėkliaus formavimasis. A – pagal gožos taško hipotezes, B – pagal infragravitacinių bangų hipotezes (B schema pagal Carter et al., 1973)

Fig. 1. Bar genesis. A – according to break-point hypothesis, B – according to infragravity wave hypothesis (Scheme B according to Carter et al., 1973)

Pagrindinis šių hipotezių grupės trūkumas yra tas, jog sėklių genezei yra reikalingos tam tikro dominuojančio dažnio infragravitacinės bangos, kurios, kaip rodo stebėjimai, pasitaiko retai. Infragravitacinės bangos būna plataus spektro, todėl jų mazgai ir pūpsniai išsibarsto po visą gožos zoną, tokiu atveju sėkliai ties jais nesiformuoja

(Sallenger, Holman, 1987). Be to, dėl infragravitacinių bangų matavimo sudėtingumo nėra šias hipotezes patvirtinančių lauko tyrimų (Davidson-Arnott, 2010).

Saviorganizacijos hipotezės. Saviorganizacijos hipotezėse teigiama, kad dėl nelineinių grįžtamųjų ryšių sąveikos tarp jūros dugno ir hidrodinaminių procesų susidaro morfologiniai elementai, palaikantys priekrantės geomorfinės sistemos stabilumą. Šios hipotezės atstovai, priešingai negu gožos taško ir infragravitacinių bangų hipotezių šalininkai, netraktuoja sėklių genezės kaip tiesioginio atsako į hidrodinaminius procesus ir pabrėžia morfologijos įtaką nešmenų bei vandens srautams priekrantėje. Saviorganizacijos mechanizmai iš esmės paaiškina visų sėklių tipų formavimąsi (Wijnberg, Kroon, 2002).

Vis dėlto, anot K. Wijnberg ir A. Kroono (2002), nėra tvirtų įrodymų, patvirtinančių konkretų sėklių formavimosi mechanizmą. Dabar dažniausiai laikomasi nuomonės, jog dviejų dimensijų sėkliai yra nešmenų konvergencijos ties bangų gožos tašku rezultatas (Masselink, Kroon, 2009), o kaip labiausiai tikėtinas ritmiškos formos sėklių formavimosi mechanizmas įvardijama saviorganizacija (Falques et al., 2008). Iš esmės tokio požiūrio laikomasi ir atliekant šį tyrimą bei nagrinėjant Kuršių nerijos sėklių morfologinę struktūrą.

1.2. Priekrantės sėklių tipologinis suskirstymas

Nepaisant įvairių egzistuojančių sėklių morfologinio tipizavimo pavyzdžių ir bandymų parengti sėklių klasifikacines schemas (Greenwood, Davidson-Arnott, 1979; Wijnberg, Kroon, 2002), universalios sėklių morfologinės klasifikacijos iki šiol nėra. Todėl rengiant šį darbą, apibendrintos įvairių autorių sudarytos sėklių klasifikacijos, išskirti pagrindiniai sėklių tipai pagal jų bendrąsias morfologines charakteristikas.

1 lentelė. Skirtingų sėklių tipų morfometrinių parametrų¹

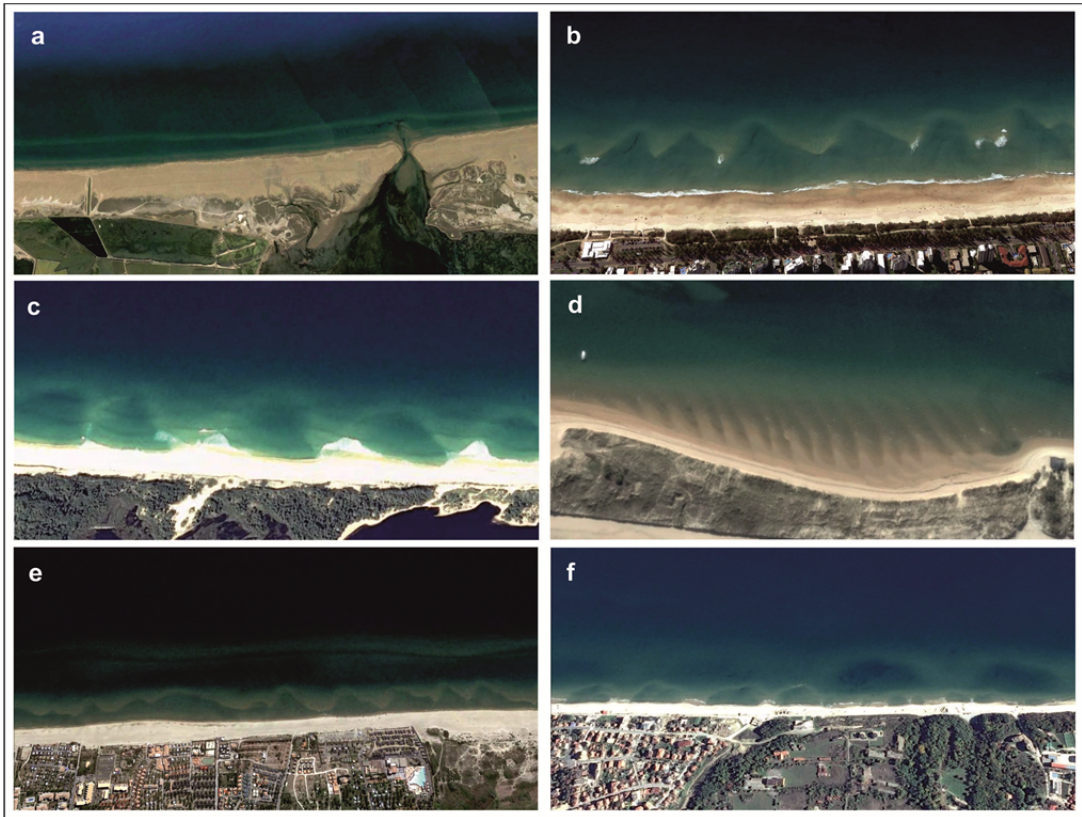
Table 1. Morphometric parameters of different bar types¹

Sėkliaus tipas / Bar type	Sėklių skaičius / Number of bars	Sėkliaus viršūnės atstumas nuo kranto, m / Bar crest distance offshore, m	Sėkliaus aukštis, m / Bar height, m	Sėkliaus viršūnės gylis, m / Depth over bar crest, m	Sėkliaus plotis, m / Bar cross- shore width, m	Sėkliaus bangos ilgis, m / Bar wave length, m	Sėkliaus amplitudė, m / Bar amplitude, m
Dviejų dimensijų išilginis sėklis / Two dimensional longshore bar	1–30	10–1350	0,2–4,75	0,1–7,5	20–700	-	-
Trijų dimensijų išil- ginis / pusešmenio sėklis / Three dimensional long- shore / crescentic bar					-	30–4000	5–110
Skersinis sėklis / Transverse bar	1–15	-	0,1–2,5	iki 4,7	-	5–500	1–3500

¹ Šaltiniai / Sources: Pruszek et al., 1997; Ruessink, Kroon, 1994; Plant et al., 1999; Larson, Kraus, 1994; Aagaard et al., 2008; Aagaard et al., 2010; Dai et al., 2008; Di Leonardo, Ruggiero, 2014; Short, 1992; Short, 1975; Short, 1979; Wijnberg, Kroon, 2002; Greenwood, 2005; Hunter et al., 1979; Aagaard, 1988; Ruessink et al., 2000; Van Enckevort, Ruessink, 2003b; Almar et al., 2009; Greenwood, Mittler, 1984; Van Enckevort et al., 2004; Konicki, Holman, 2000; Gelfelbaum, Brooks, 2003; Carter, 1978; Ribas et al., 2007; Levoy et al., 2013; Eliot et al., 2006.

Atlikta mokslinėje literatūroje esamų klasifikacijų analizė parodė, kad dažniausiai skiriamos dvi bendrosios sėklių kategorijos, paremtos jų orientacija kranto atžvilgiu: išilginiai ir skersiniai sėkliai (Ribas et al., 2016). Pirmieji pagal planinį vaizdą skirstomi į dviejų dimensijų ir trijų dimensijų išilginius (Lippmann, Holman, 1990; Wijnberg, Kroon, 2002).

Dviejų dimensijų išilginiai sėkliai apima vientisus, tiesius sėklius, išsidėsčiusius lygiagrečiai kranto (2 pav. a) (Lippmann, Holman, 1990; Wijnberg, Kroon, 2002). Paprastai jie yra siejami su didele bangų energija ir audromis (Wright, Short, 1984; Short, Aagaard, 1993) arba vidutinės ir mažos energijos bangomis, sklindančiomis įstrižai kranto linijai, bei jų sukelta stipria išilgine srove (Price et al., 2014).



2 pav. Skirtingų sėklių tipų pavyzdžiai: a – dvigubas dviejų dimensijų išilginis sėklius Prancūzijos Liono įlankos pakrantėje; b – trijų dimensijų išilginis (pusmėnulio) sėklius Australijos pietrytinėje pakrantėje; c – prie kranto prisišliejęs sėklius Australijos pietrytinėje pakrantėje; d – skersiniai „piršto“ sėkliai Ispanijoje, Biskajos įlankoje; e – dvigubas sėklius Prancūzijos Liono įlankoje (1 – trijų dimensijų išilginis, 2 – dviejų dimensijų išilginis); f – dvigubas sėklius Bulgarijoje, Juodosios jūros pakrantėje (1 – prie kranto prisišliejęs, 2 – trijų dimensijų išilginis) (Google Earth nuotraukos)

Fig. 2. Examples of different bar types: a – double two dimensional longshore bar at Gulf of Lion, France; b – single three dimensional longshore bar at Australia South Eastern coast; c – single shore-attached bar at Australia South Eastern coast; d – transverse finger bar at Bay of Biscay, Spain; e – double bar at Gulf of Lion, France (1 – three dimensional longshore, 2 – two dimensional longshore); f – double bar at Black sea, Bulgaria (1 – shore-attached (transverse); 2 – three dimensional longshore) (photos: Google Earth)

Trijų dimensijų išilginiams sėkliams iš esmės priskiriami visi lygiagrečiai kranto išsidėstę sėkliai, pasižymintys formos nepastovumu išilgai kranto (2 pav. b). Jie gali būti

vingiuoti arba pusmėnulio formos, nutrūkstantys arba vientisi. Jų forma gali būti ritmiška (taisyklinga) arba neritmiška (netaisyklinga) (Lipmann, Holman, 1990; Wijnberg, Kroon, 2002). Trijų dimensijų išilginiams sėkliams įvardyti dažnai vartojamas pusmėnulio sėklių terminas (Van Enckevort, Ruessink, 2003b, Van Enckevort et al., 2004; Falques et al., 2008; Ruessink et al., 2013). Pagrindinė pusmėnulio sėklių struktūros charakteristika yra išilga krantui pusmėnulio formos seklumų (ragų) ir jas skiriančių įlankų, besikaitaliojančių ir nukreiptų kranto bei jūros link, seka. Šio tipo sėkliai būdingi įlankų ir atvirų jūrų priekrantėms, kurių vidutinis nuolydis siekia iki 0,05 (Falques et al., 2008). Atstumai tarp jiems būdingų pusmėnulio ragų (bangos ilgis) siekia nuo kelių dešimčių metrų iki kelių kilometrų (1 lentelė) ir didėja sėkliui tolstant nuo kranto, o jų amplitudė siekia iki 110 m (1 lentelė). Tačiau atstumai tarp to paties sėkliaus elementų dažniausiai labai nevienodi (2 pav. f) (Van Enckevort et al., 2004). Pusmėnulio sėkliai yra siejami su sumažėjusia bangų energija po audrų, kai jie išsivysto iš tiesių dviejų dimensijų sėklių (Wright, Short, 1984; Lippmann, Holman, 1990; Short, Aagaard, 1993).

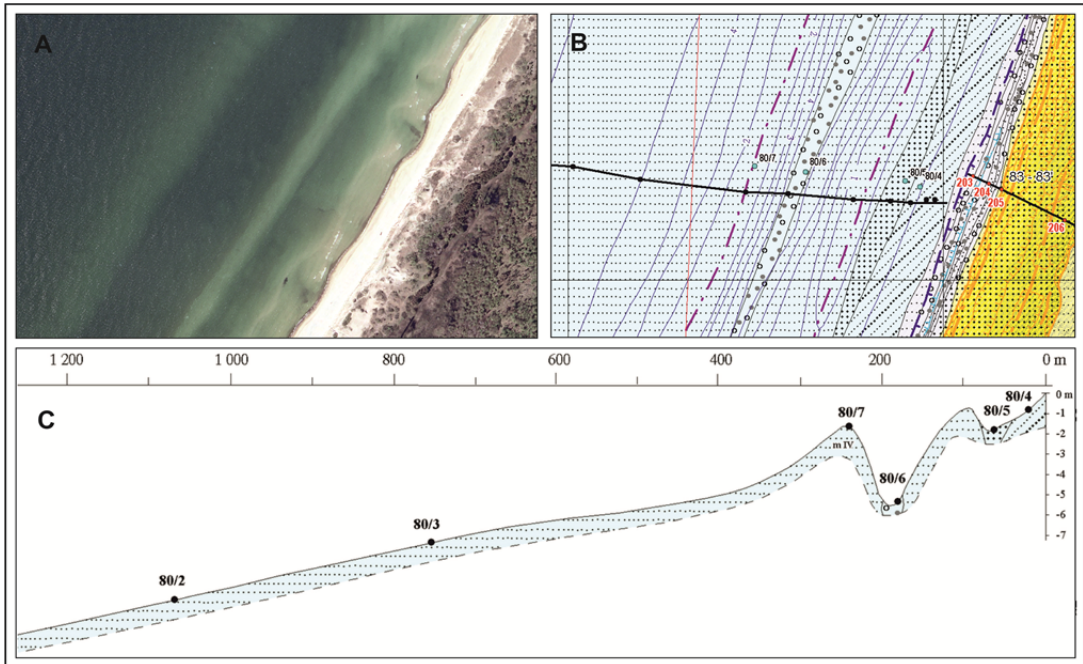
Skersinių sėklių terminas yra vartojamas apibūdinti sėkliams, kurie yra prisišlieję prie kranto, o jų viršūnės orientuotos skersai arba įstrižai krantui ir nutįsusios tolyn nuo jo (Ribas et al., 2016). Tačiau šie sėkliai pasižymi skirtingomis morfologinėmis savybės ir formavimosi sąlygomis, todėl reikėtų atskirti bent du skersinių sėklių tipus. Pirmojo tipo skersiniai sėkliai (dar vadinami prie kranto prisišliejusiais sėkliais (Wijnberg, Kroon, 2002)) formuojasi esant mažos energijos bangoms, kai trijų dimensijų išilginių (pusmėnulio) sėklių ragai prisitvirtina prie kranto (Wright, Short, 1984). Prie kranto prisišliejusių sėklių struktūrą apibūdina besikaitaliojantys ritmiški arba neritmiški platūs ragai (seklumos), trumpomis, prie kranto prisitvirtinusiomis viršūnėmis, ir protakų kanalai (2 pav. c) (Wijnberg, Kroon, 2002; Ribas, Kroon, 2007).

Skersinių „piršto“ sėklių terminas buvo pasiūlytas apibrėžti antro tipo skersinius sėklius, kurie formuojasi nepriklausomai nuo trijų dimensijų išilginių sėklių (Ribas, Kroon, 2007). Skersiniai „piršto“ sėkliai yra siauri ir pasižymi ilgomis viršūnėmis (2 pav. d), tai juos skiria nuo pirmojo tipo skersinių sėklių (Ribas et al., 2016). Atstumas tarp „piršto“ sėklių iškyšulių, apibūdinamas kaip bangos ilgis, gali varijuoti nuo kelių metrų iki pusės kilometro (1 lentelė), o iškyšulių ilgis skersai kranto varijuoja nuo 1 m (Carter, 1978) iki 3500 m (Gelfenbaum, Brooks, 2003). Skersiniai „piršto“ sėkliai dažniausiai siejami su mažos energijos sąlygomis (Carter, 1978; Eliot et al., 2006; Gelfenbaum, Brooks, 2003), tačiau gali formuotis ir esant vidutinei bangų energijai (Konicki, Holman, 2006).

Keliagubo sėkliaus sistemose visi sėkliai retai būna to paties morfologinio tipo: įkrančiausias sėklius paprastai pasižymi sudėtingiausia forma, o įjūriausiasio sėkliaus forma būna artimiausia dviejų dimensijų sėkliams (2 pav. e) (Aagaard, 1991; Short, 1992; Short, Aagaard, 1993). Jeigu visiems keliagubo sėkliaus sistemos sėkliams būdinga ritmiška forma, tada atstumas tarp jos elementų didėja didėjant sėkliaus atstumui nuo kranto (2 pav. f).

1.3. Priekrantės sėklių morfologinių savybių analizės metodika

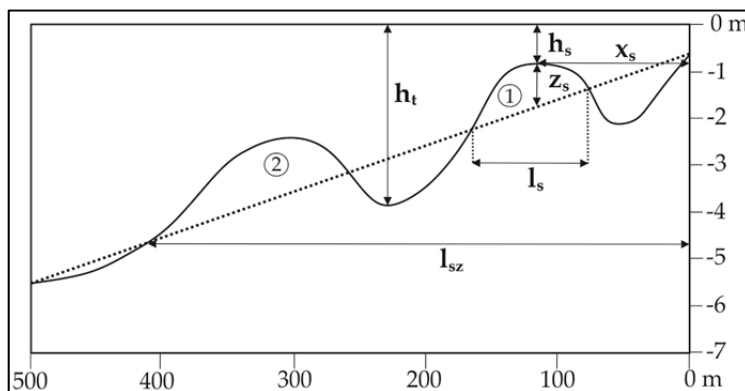
Darbe Kuršių nerijos priekrantės sėklių struktūrai nustatyti naudojami 2004 m. Lietuvos geologijos tarnybos parengto Baltijos jūros Lietuvos krantų geologijos atlaso (Baltijos jūros..., 2004) žemėlapiai (3 pav. B) bei to paties atlaso priekrantės morfologiniai profiliai (3 pav. C) ir 2005–2006 m. (artimiausio atlasui laikotarpio) Lietuvos rastrinis ortofotografinis žemėlapis (ORT10LT) (3 pav. A) (Lietuvos Respublikos..., 2005).



3 pav. Kuršių nerijos sėklių struktūrai vertinti naudoti duomenų šaltiniai: A – 2005–2006 m. Lietuvos rastrinio ortofotografinio žemėlapio fragmentas (Lietuvos Respublikos..., 2005), B – Baltijos jūros Lietuvos krantų geologinio atlaso žemėlapio fragmentas, C – Baltijos jūros Lietuvos krantų geologijos atlaso priekrantės morfolitologinis profilis (Baltijos jūros..., 2004)

Fig. 3. Data sources used to evaluate structure of bars in the Curonian Spit: A – raster orthophoto map of Lithuania (2005–2006) (Lietuvos Respublikos..., 2005), B – map of Geological Atlas of Lithuanian Baltic Sea Coast, C – nearshore crossshore profile from the Geological Atlas of Lithuanian Baltic Sea Coast (Baltijos jūros..., 2004)

Iš viso analizuoti 46 priekrantės skersiniai profiliai, vertinant morfometrinius parametrus sėklių zonoje. Remiantis atlaso duomenimis, vertinti tokie morfometriniai sėklių parametrai (4 pav.): sėklių zonos nuolydis, sėklių zonos plotis (l_{sz}), sėklių skaičius (1 – pirmas sėklius, 2 – antras sėklius), sėkliaus viršūnės gylis (h_s), tarpinė gylis (h_t), sėkliaus aukštis (z_s), plotis (l_s) ir sėkliaus viršūnės atstumas nuo kranto (x_s).



4 pav. Sėkliaus morfometrinių parametru apibūdinimas

Fig. 4. Definition of morphometric bar parameters

Ortofotografinis žemėlapis buvo naudojamas sėklių tipologinei struktūrai identifikuoti. Skirtinga sėklių struktūra pasižymintys ruožai buvo išskirti remiantis Baltijos jūros Lietuvos krantų geologinio atlaso skersiniais priekrantės profiliais, atsižvelgiant į tris pagrindinius kriterijus: sėklių zonos plotį, sėklių skaičių bei dydį, ir detalizuojant atlase pateiktą Kuršių nerijos priekrantės morfologinį skirstymą (Žaromskis, 2004) (pastarajame išskirtos 4 atkarpos).

2. Rezultatai

2.1. Kuršių nerijos jūros priekrantės sėklių tipologinė analizė

Baltijos jūros priekrantei Kuršių nerijoje būdinga keliagubo sėkliaus sistema, apimanti nuo dviejų iki septynių sėklių. Šioje priekrantėje aptinkami trijų tipų sėkliai: dviejų dimensių išilginiai, trijų dimensių išilginiai ir prie kranto prisišlieję sėkliai (skersiniai sėkliai, išsivystantys iš trijų dimensių išilginių sėklių). Trijų dimensių išilginiai ir prie kranto prisišlieję sėkliai Kuršių nerijoje yra labai netaisyklingi: jų ragai labai nevienodo dydžio, išsidėstę nevienodais atstumais ir nepasižymi taisyklinga pusemėnuli forma.

Ijūriusias sėklius dažniausiai yra tiesus (dviejų dimensių išilginis) (5 pav. a, b), tačiau vietomis pasižymi mažai išreikštu vingiuotumu (5 pav. c). Tai ypač būdinga šiaurinei Kuršių nerijos priekrantės daliai, kur ijūriusai sėkliai yra mažesni ir arčiau kranto, todėl greičiau įgauna trijų dimensių pavidalą. Šis ijūrinio sėkliaus bruožas išryškėja apie 7,7 km ilgio atkarpoje Koggalio–Alksnynės ruože ir trumpoje 1,5 km ilgio atkarpoje piečiau Nidos. Atstumas tarp ijūrinio sėkliaus ragų šiose atkarpose varijuoja nuo 120 iki 700 metrų. Likusioje Kuršių nerijos jūros priekrantės dalyje ijūrinis sėklius išlaiko dviejų dimensių išilginio sėkliaus pavidalą.

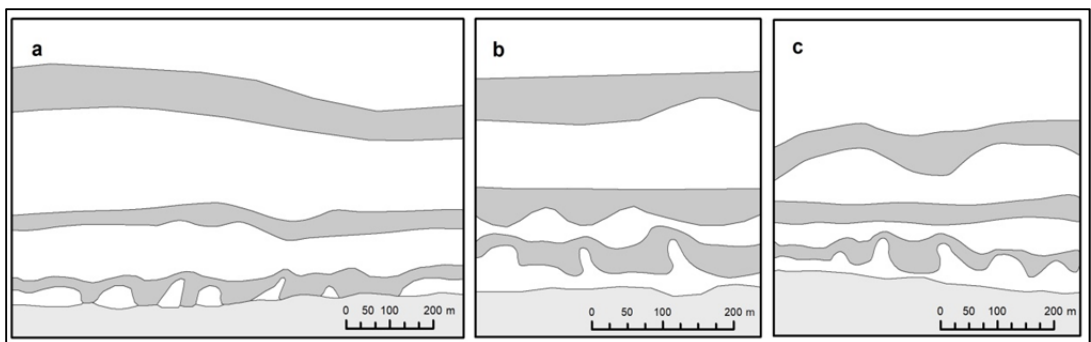
Antrasis labiausiai nuo kranto nutolęs sėklius didžiojoje Kuršių nerijos jūros priekrantės dalyje taip pat yra dviejų dimensių (5 pav. a, c) ir mažai išreikštomis trijų dimensių formomis pasižymi tik atskirose, pavienėse atkarpose (5 pav. b). Tai iš esmės būdinga visai šiaurinei Kuršių nerijos daliai, apie 15 km ilgio ruožui nuo Klaipėdos uosto molo, kur antrasis labiausiai nuo kranto nutolęs sėklius pasižymi tam tikro laipsnio trijų dimensių pavidalu. Tačiau paminėtina tai, kad ijūriusių sėklių tipų vertinimas šiaurinėje Kuršių nerijos dalyje yra komplikuotas, nes čia jūros priekrantė pasižymi sėklių skaičiaus nepastovumu (anksčiau aptartas pirmasis (Koggalio–Smiltynės) ruožas), todėl, kalbant apie ijūriusius sėklius, dažnai turima omenyje skirtingi sėkliai. Pastovesnės sėklių struktūros ruožuose antrasis labiausiai nuo kranto nutolęs sėklius trijų dimensių pavidalą įgauna gerokai trumpesnėse atkarpose. Paminėtinos šios atkarpos: apie 2 km ilgio atkarpa piečiau Juodkrantės (20–22 km atstumu nuo Klaipėdos uosto molo); 1,3 km ilgio atkarpa (25,8–27,1 km atstumu nuo Klaipėdos uosto molo); 1,9 km atkarpa piečiau Preilos (41,5–43,4 km atstumu nuo Klaipėdos uosto molo); 1,2 km ilgio atkarpa piečiau Nidos (49–50,2 km atstumu nuo Klaipėdos uosto molo). Atkarpose, kur antrasis labiausiai nuo kranto nutolęs sėklius įgauna trijų dimensių formą, atstumas tarp jo ragų siekia 70–450 metrų.

Arčiau kranto esančių sėklių morfologinis tipas labai nepastovus: jis keičiasi nuo dviejų iki trijų dimensių išilginio ir prie kranto prisišliejusio (5 pav. a, b, c). Pirmi du įkrantiniai sėkliai (antrasis tuo atveju, jei yra daugiau negu trys sėkliai) yra tiesūs ir nėra įgavę bent nežymaus vingiuotumo tik keliose trumpose atkarpose: 1,7 km ilgio atkarpoje

piečiau Alksnynės (10,3–12 km atstumu nuo Klaipėdos uosto molo); 1,8 km ilgio atkarpoje šiauriau Pervalkos (28,5–30,3 km atstumu nuo Klaipėdos uosto molo); 1,5 m ilgio atkarpoje piečiau Preilos (41–42,5 km atstumu nuo Klaipėdos uosto molo). Prie krantų prisišliėjusių sėklių atkarpos išryškėja keliuose zonose:

- 1) ryškiausia prie kranto prisišliėjusių sėklių zona yra išsidėsčiusi apie 5,3 km ilgio ruože nuo šiaurinės Nidos dalies iki lietuviškosios Kuršių nerijos dalies ribos. Prie kranto prisišliėję sėkliai šioje zonoje išsidėstę trijose 0,5–1,5 km ilgio atkarpose. Atstumas tarp prie kranto prisitvirtinusių sėkliaus ragų šioje zonoje siekia nuo 100 iki 350 metrų. Skersinio sėkliaus viršūnės ilgis varijuoja nuo 30 iki 60 metrų.
- 2) kita prie kranto prisišliėjusių sėklių zona yra išsidėsčiusi 7,8 km ilgio ruože piečiau Juodkrantės ir šiauriau Pervalkos, kur skersiniai sėkliai yra išsibarstę keturiose 0,4–1,5 km ilgio atkarpose. Atstumas tarp sėkliaus ragų šioje zonoje varijuoja nuo 45 iki 250 m, o sėkliaus viršūnės ilgis nuo 20 iki 70 metrų.
- 3) trečioji prie kranto prisišliėjusių sėklių zona apima 7 km ilgio ruožą, kuris prasideda piečiau Alksnynės ir tęsiasi iki Juodkrantės. Šioje zonoje prie kranto prisišliėję sėkliai išsibarstę trumpose 0,2–0,6 km ilgio atkarpėlose. Atstumas tarp sėkliaus ragų šioje zonoje siekia 40–180 m, o sėkliaus viršūnės ilgis, kaip ir ankstesnėje zonoje, 20–70 metrų.

Likusioje Kuršių nerijos jūros priekrantės dalyje pirmasis įkrantinis ir antrasis įkrantinis (jei priekrantei būdinga daugiau negu trys sėkliai) yra trijų dimensijų išilginiai. Atstumas tarp šių sėklių ragų visoje Kuršių nerijoje yra labai nevienodas ir varijuoja nuo 50 iki 450 metrų. Pirmojo įkrantinio trijų dimensijų sėkliaus ragai daug kur labai išplatėję, jų plotis vietomis siekia iki 200 m, ir priartėję prie kranto. Jie yra artimi prie kranto prisišliėjusio sėkliaus tipui, tačiau, kadangi jų ragai dar nėra prisitvirtinę prie kranto, o jų tarpinė lieka vientisas, jie priskirti trijų dimensijų išilginiams sėkliams.



5 pav. Kuršių nerijos sėklių pavyzdžiai: a – trigubas sėklius ties Lietuvos ir Rusijos riba (1 sėklius – prisišliėjęs prie kranto, 2, 3 – dviejų dimensijų išilginiai), b – trigubas sėklius piečiau Smiltynės (1, 2 sėkliai – trijų dimensijų išilginiai, 3 – dviejų dimensijų išilginis), c – trigubas sėklius ties Alksnyne (1 sėklius – netaisyklingas trijų dimensijų išilginis, 2 – dviejų dimensijų išilginis, 3 – įgaunantis trijų dimensijų pavidalą)

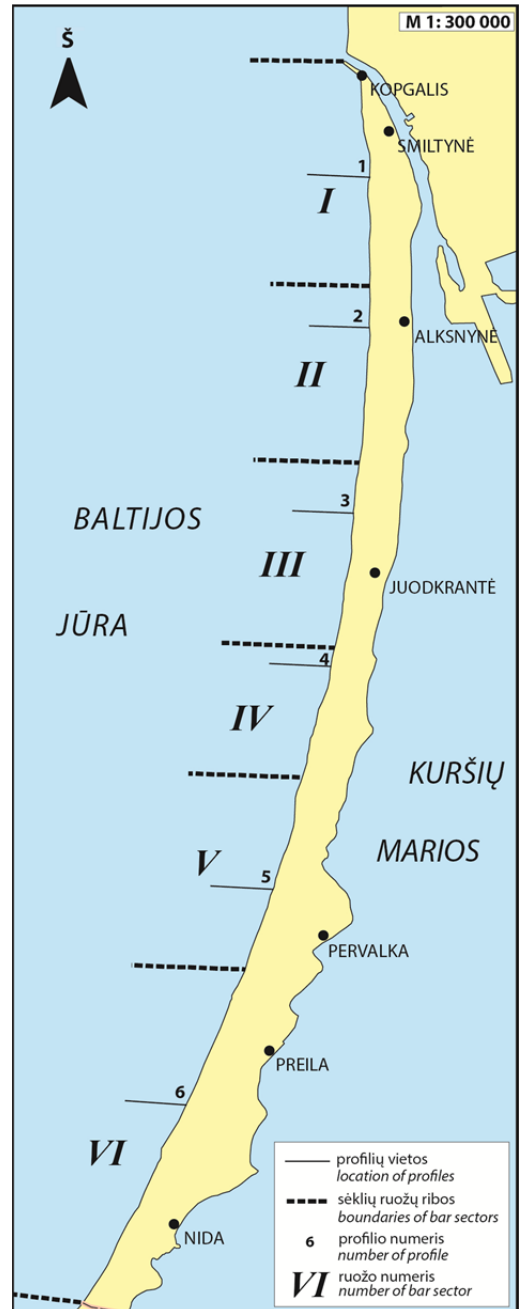
Fig. 5. Examples of Curonian Spit bars: a – triple bar at the border of Lithuania and Russia (1 bar – shore attached, 2, 3 – two dimensional longshore), b – triple bar to the south from Smiltynė (1, 2 bars – three dimensional longshore, 3 – two dimensional longshore), c – triple bar at Alksnynė (1 bar – irregular three dimensional longshore, 2 – two dimensional longshore, 3 – evolving three dimensional longshore)

2.2. Kuršių nerijos jūros priekrantės sėklių morfologija

Kuršių nerijos Baltijos jūros priekrantės nuolydis sėklių zonoje varijuoja nuo 0,009 iki 0,013. Priekrantės sėkliai Kuršių nerijoje pasižymi gana vienoda litologine struktūra, juose vyrauja smulkiagrūdis smėlis (0,1–0,25 mm). Tarpsėklių litologinė sandara mažiau vienalytė, juose vietomis išryškėja rupesnės sudėties nuosėdos: nuo vidutینگrūdžio (0,25–0,5 mm) iki rupaus (0,5–1 mm) smėlio arba įvairaus santykio jų mišinio, kartais pajavairinto žvirgždo nuosėdomis. Itin išsiskiria pietinėje Kuršių nerijos dalyje esančio įjūriausio sėkliaus tarpsėklis, kuriam būdinga labai nevienalytė nuosėdų sudėtis, apimanti visą nuosėdų įvairovę nuo smulkiagrūdžio smėlio iki žvirgždo ir gargždo mišinio. Kuršių nerijos jūros priekrantėje išryškėja 6 skirtinga morfologine struktūra pasižymintys ruožai (6 pav.).

Pirmasis ruožas (Smiltynės) apima apie 9 km ilgio atkarpą šiaurinėje Kuršių nerijos priekrantės dalyje ir tęsiasi nuo Kopgalio iki kiek šiauriau Alksnynės (6 pav.). Jis išsiskiria palyginti siaura sėklių zona, sėkliai šiame ruože nedideli, išsidėstę arti kranto ir nedideliais atstumais vienas nuo kito. Sėklių skaičius Smiltynės ruože labai nepastovus: nuo 2 iki 7. Sėklių zonos plotis šiame ruože siekia nuo 305 m iki 685 m (vidutiniškai apie 400 m). Sėklių zonos nuolydis keičiasi nuo 0,010 iki 0,013. Smiltynės ruožą reprezentuoja 1 profilis (7 pav.), kuriam būdingi 3 nedideli sėkliai: 0,2–1 m aukščio ir 20–85 m pločio. Jie išsidėstę 160–285 m atstumu nuo kranto, 1,4–3,8 m gylyje.

Antrasis ruožas (Alksnynės) apima Kuršių nerijos jūros priekrantės atkarpą, esančią 9–16 km atstumu nuo Klaipėdos uosto molo (6 pav.). Alksnynės ruožas pasižymi platesne bei pastovesne sėklių zona ir didesniais sėkliais negu Kopgalio ruožas. Sėklių zonos plotis šioje atkarpoje gana pastovus ir siekia nuo 425 iki 520 m (vidutiniškai apie 480 m). Sėklių zonos



6 pav. Kuršių nerijos priekrantės sėklių morfologinių ruožų ir juos iliustruojančių profilių lokalizacijos kartoschema

Fig. 6. Kartoschema of morphological sectors of Curonian Spit nearshore bars and locations of cross-shore profiles illustrating them

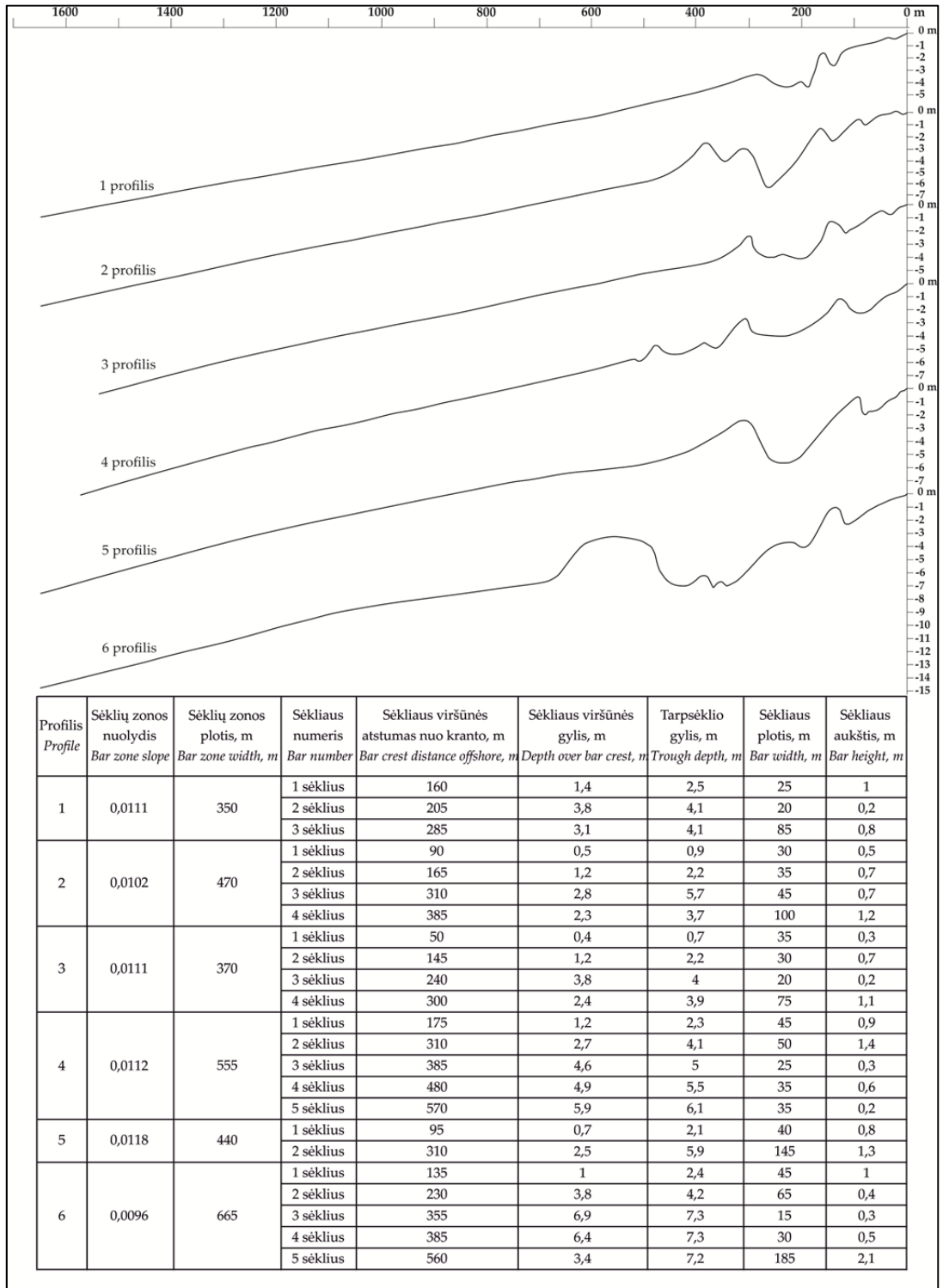
nuolydis taip pat gana vienodas: visame Alksnynės ruože siekia apie 0,010. Atkarpoje vyrauja 4 sėkliai. Toks jų skaičius išryškėja ir Alksnynės ruožą iliustruojančiame 2 profilyje (7 pav.). Šiame profilyje pirmieji du įkrančiau esantys sėkliai yra atskirti nuo įjūresnių sėklių palyginti gilaus (5,7 m) tarpseklio. Sėkliai profilyje išsidėstę 0,5–2,8 m gylyje, 90–385 m atstumu nuo kranto. Jų aukštis siekia 0,5–1,2 m, o plotis – 30–100 metrų.

Trečiasis sėklių morfologinis ruožas (Juodkrantės) apima 16–23,5 km atstumu nuo Klaipėdos uosto molo esančią jūros priekrantės atkarpą (6 pav.). Šiame ruože sėklių zona vėl susiaurėja ir pasižymi mažesniais sėkliais. Joje vyrauja nedideli arti kranto esantys sėkliai ir palaiptams išryškėja didesnis įjūriausias sėklus, nuo kitų atskirtas plataus tarpseklio. Sėklių zonos plotis Juodkrantės ruože siekia 365–430 m (vidutiniškai apie 390 m), sėklių zonos nuolydis čia padidėja iki 0,011–0,013. Didžiojoje Juodkrantės ruožo dalyje vyrauja 3 sėkliai, tačiau keliuose profiliuose išryškėja 4–5. Pastarąją atkarpą iliustruoja 3 profilis (7 pav.), kuriam būdingi 4 sėkliai, apimantys šiam ruožui būdingus du arčiau kranto esančius sėklus (30–35 m pločio, 0,3–0,7 m aukščio), nuo įjūriausio sėkliaus (75 m pločio, 1,1 m aukščio) atskirtus šiam ruožui būdingo plataus tarpseklio. Profilio vietoje šiame tarpseklyje įsiterpia nedidelis, išsklaidytas 0,2 m aukščio sėkliukas.

Ketvirtasis ruožas (Avikalnio) apima priekrantės atkarpą, išsidėsčiusią 23,5–29 km atstumu nuo Klaipėdos uosto molo (6 pav.). Tai pereinamasis ruožas, pasižymintis platesne sėklių zona ir didesniu jų skaičiumi negu Juodkrantės ruožas (būdingi 4–7 sėkliai), kuriame susiformuoja pietinei Kuršių nerijos jūros priekrantės daliai būdingo didelio įjūriausio sėkliaus užuomazgos. Šiame ruože minėtas sėklus labai neaukštas ir išsklaidytas. Apskritai sėklių zonos plotis Avikalnio ruože siekia 540–675 m (vidutiniškai apie 590 m), jų zonos nuolydis sumažėja iki 0,009–0,011, būdingi neaukšti sėkliai. Šį ruožą reprezentuoja 4 profilis (7 pav.) su 5 sėkliais, kurie nuo kranto nutolę 175–570 m atstumu. Jie nedideli: 25–50 m pločio ir 0,2–1,4 m aukščio.

Penktasis ruožas (Pervalkos) apima 29–37 km atstumu nuo Klaipėdos uosto molo išsidėsčiusią Kuršių nerijos jūros priekrantės dalį (6 pav.). Pervalkos ruože sėklių zona kiek susiaurėja ir siekia 365–680 m (vidutiniškai apie 470 m), o jų skaičius joje palaiptams mažėja. Būdinga nuo 2 iki 4 sėklių. Sėklių zonos nuolydis padidėja iki 0,010–0,013. Šiame ruože sėkliai didesni negu ketvirtajame, padidėja įjūriausio sėkliaus apimtis, o jo tarpsekliis tampa itin gilus ir pasiekia 8,2 m gylį. Pervalkos ruožui būdingus bruožus atspindi 5 profilis (7 pav.). Jam būdingi du sėkliai, esantys 95 ir 310 m atstumu nuo kranto. Jų plotis – 40 ir 145 m, o aukštis – 0,8 ir 1,3 metro.

Šeštasis ruožas (Preilos–Nidos) apima apie 15 km ilgio jūros priekrantės atkarpą, besitęsiančią 37 km nuo Klaipėdos uosto molo iki lietuviškosios Kuršių nerijos dalies pabaigos (6 pav.). Šis ruožas išsiskiria plačiausia 505–720 m pločio (vidutiniškai apie 610 m) sėklių zona Kuršių nerijos jūros priekrantėje. Sėklių zonos nuolydis artimas Pervalkos ruožui: 0,010–0,012. Nidos ruože vyrauja 2–3 sėkliai ir tik trumpoje atkarpoje ties Preilos ragu išryškėja 5 sėkliai. Preilos–Nidos ruože įjūriausias sėklus yra itin didelis, o jo tarpsekliis – gilus ir išplatėjęs. Šeštąjį ruožą reprezentuojančiame 6 profilyje (7 pav.) šio sėkliaus plotis siekia 185 m, aukštis – 2,1 m, o jo tarpseklio gylis – per 7 metrus. Minėtam profiliui iš viso būdingi 5 sėkliai, nutolę 135–560 m atstumu nuo kranto. Pirmieji keturi sėkliai, palyginti su penktuoju, nedideli, jų plotis – 15–65 m, o aukštis – 0,3–1 metras.



7 pav. Kuršių nerijos priekrantės skersinių profilių pavyzdžiai (pagal Baltijos jūros..., 2004) ir sėklių parametrai profiliuose

Fig. 7. Examples of Curonian Spit nearshore cross-shore profiles (according to Baltijos jūros..., 2004) and parameters of bars in the profiles

Išvados

1. Priekrantės sėkliams būdinga nevienoda morfologinė struktūra, nulemta bangų režimo, priekrantės srovių, priekrantės nuolydžio ir smėlio mechaninės sudėties, kuri leidžia išskirti keturis pagrindinius sėklių tipus: dviejų dimensijų ir trijų dimensijų išilginius sėklius bei prie kranto prisišliejusius ir skersinius „piršto“ sėklius, tačiau dėl procesų, lemiančių sėklių genezės ir dinamikos procesus, pažinimo trūkumo sėklių tipologija nėra išbaigta, o jų tipai traktuojami labai nevienodai.
2. Sėklių formavimasis gali būti apibūdinamas per tris pagrindinius mechanizmus: nešmenų konvergenciją ties bangų gožos tašku, nešmenų konvergenciją po stovinčios bangos mazgais arba pūpsniais ir grįžtamųjų ryšių priekrantės morfodinaminėje sistemoje sąveiką.
3. Kuršių nerijos priekrantėje išryškėja šeši nevienoda morfologine struktūra pasižymintys ruožai: šiaurinėje Kuršių nerijos dalyje vyrauja palyginti siaura sėklių zona, pasižyminti nepastoviu jų skaičiumi ir smulkiais sėkliais, o pietinėje Kuršių nerijos dalyje sėklių zona yra išplatėjusi ir pasižymi mažesniu bei pastovesniu sėklių skaičiumi, iš kurių išsiskiria stambus jūriaušias sėklius su giliu tarpsekliau.
4. Kuršių nerijos jūros priekrantės sėklių tipologinėje struktūroje tarp toliausiai nuo kranto nutolusių sėklių dominuoja dviejų dimensijų išilginiai sėkliai, tuo tarpu arčiausiai kranto esantys įkrantiniai sėkliai skirtingose atkarpose būna nuo dviejų iki trijų dimensijų išilginių ir prie kranto prisišliejusiu sėklių.
5. Straipsnyje analizuojami vienalaikiai duomenys apie priekrantės sėklių struktūrą, o sėkliai – labai dinamiškos jūros dugno reljefo formos, todėl, norint įvertinti straipsnyje aptartos sėklių morfologinės struktūros pastovumą, reikalingas tolesnis Kuršių nerijos priekrantės sėklių dinamikos tyrimas.

Literatūra

- Aagaard, T., 1988. Nearshore Bar Morphology on the Low-Energy Coast of Northern Zealand, Denmark. *Geografiska Annaler*, 70 (1/2), p. 59–67.
- Aagaard, T., 1991. Multiple-Bar Morphodynamics and Its Relations to Low-Frequency Edge Waves. *Journal of Coastal Research*, 7(3), p. 801–813.
- Aagaard, T., Kroon, A., Hughes, M.G., Greenwood, B., 2008. Field Observations of Nearshore Bar Formation. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33, p. 1021–1032.
- Aagaard, T., Kroon, A., Greenwood, B., Hughes, M. G., 2010. Observations of Offshore Bar Decay: Sediment Budgets and the Role of Lower Shoreface Processes. *Continental Shelf Research*, 30, p. 1497 – 1510.
- Almar, R., Castelle, B., Ruessink, B.G., Senechal, N., Bonneton, P., Marieu, V., 2009. High-Frequency Video Observation of Two Nearby Double-Barred Beaches under High-Energy Wave Forcing. *Journal of Coastal Research*, SI 56.
- Bagdanavičiūtė, I., Kelpšaitė, L., Daunys, D., 2012. Assessment of Shoreline Changes Along the Lithuanian Baltic Sea Coast During the Period 1947–2010. *Baltica*, 25 (2), p. 171-184.
- Baltijos jūros Lietuvos krantų geologinis atlasas*. 2004. Vilnius: Lietuvos geologijos tarnyba.
- Bird, E., 2008. Bars and Throughs. *Coastal Geomorphology: An Introduction*. Chichester: Wiley and Sons, p. 242 –245.
- Boczar-Karakiewicz, B., Davidson-Arnott, R. G. D., 1987. Nearshore Bar Formation by Non-Linear Wave Processes—a Comparison of Model Results and Field Data. *Marine Geology*, 77, p. 287–304.
- Bowen, A. J., 1980. Simple Models of Nearshore Sedimentation: Beach Profiles and Longshore Bars. *The Coastline of Canada: Littoral Processes and Shore Morphology*. Geological Survey of Canada, ED. S.B. McCann, p. 1–11.
- Bowen, A. J., Inman, D. L., 1971. Edge Waves and Crescentic Bars. *Journal of Geophysical Research*, 76, p. 8662–8671.

- Brander, R. W., 2004. Coastal Bar. *Encyclopedia of Geomorphology (Vol. 1)*, ed. A. S. Goudie. London: Routledge, p. 54–56.
- Carter, R. W. G., 1978. Small-scale Transverse Bars in Lough Neagh, Northern Ireland. *Journal of Earth Sciences*, 1, p. 205–209.
- Carter, T. G., Liu, P. L. F., Mei, C. C., 1973. Mass Transport by Waves and Offshore Sand Bedforms. *Journal of Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division, ASCE*, p. 165–184.
- Castelle, B., Ruessink, B. G., Bonneton, P., Marieu, V., Bruneau, N., Price, T. D., 2010. Coupling Mechanisms in Double Sandbar Systems, Part 1: Patterns and Physical Explanation, *Earth Surface Processes and Landforms*, 35, p. 476–486.
- Castelle, B., Scot, T., Brander, R. W., McCarroll, R. J., 2016. Rip Current Types, Circulation and Hazard. *Earth Science Reviews*, 163, p. 1–21.
- Cohn, N., Ruggiero, P., Ortiz, J., Walstra, D. J., 2014. Investigating the Role of Complex Sandbar Morphology on Nearshore Hydrodynamics. *Journal of Coastal Research*, SI 70, p.53–58.
- Dai, Z. J., Chen, J. Y., Du, J. Z., Li, C. C., 2008. Seasonal changes of sandbar behavior in Nanwan Beach, South China. *Journal of Coastal Research*, 24(5), p. 1209–1216.
- Dally, W. R., Dean, R. G., 1984. Suspended Sediment Transport and Beach Profile Evolution. *Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering*, 110 (1), p. 15–33.
- Davidson-Arnott, R. G. D., 2010. Nearshore Morphodynamics. *Introduction to Coastal Processes and Geomorphology*. Cambridge: Cambridge University Press, p. 202–215.
- De Schipper, M. A., Reniers, J. H. M., Ranasinghe, R., Stive, M. J. F., 2014. The Influence of Sea State on Formation Speed of Alongshore Variability in Surf Zone Sand Bars. *Coastal Engineering*, 91, p. 45–59.
- Di Leonardo, D., Ruggiero, P., 2015. Regional Scale Sandbar Variability: Observations from the U.S. Pacific Northwest. *Continental Shelf Research*, 95, p. 74 – 88.
- Dubarbier, B., Castelle, B., Marieu, V., Ruessink, G., 2015. Process-Based Modeling of Cross-Shore Sandbar Behavior. *Coastal Engineering*, 95, p. 35–50.
- Dyhr-Nielsen, M., Sørensen, T., 1970. Some Sand Transport Phenomena on Coasts with Bars. *Coastal Engineering Proceedings*, 12, p. 855–866.
- Elgar, S., Gallagher, E.L., Guza, R.T., 2001. Nearshore Sandbar Migration. *Journal of Geophysical Research*, 106 (C6), p. 11623–11627.
- Eliot, M. J., Travers, A., Eliot, I., 2006. Morphology of a Low-Energy Beach, Como beach, Western Australia. *Journal of Coastal Research*, 22 (1), p. 63–77.
- Falqués, A., Dodd, N., Garnier, R., Ribas, F., MacHardy, L. C., Larroudé, P., Calvete, D., Sancho, F., 2008. Rhythmic Surf Zone Bars and Morphodynamic Self-Organization. *Coastal Engineering*, 55, p. 622–641.
- Fernandez-Mora, A., Calvete, D., Falques, A., De Swart, H. E., 2015. Onshore Sand-Bar Migration in the Surf Zone: New Insights into the Wave-Induced Sediment Transport Mechanisms. *Geophysical Research Letters*, 42, p. 2869–2877.
- Gallagher, E. L., Elgar, S., Guza, R. T., 1998. Observations of Sand Bar Evolution on Natural Beach. *Journal of Geophysical Research*, 103 (C2), p. 3203–3215.
- Gelfenbaum, G., Brooks, G. R., 2003. The Morphology and Migration of Transverse Bars off the West-Central Florida Coast. *Marine Geology*, 200, p. 273–289.
- Gelumbauskaitė, L. Ž., 2003. On the Morphogenesis and Morphodynamics of the Shallow Zone off the Kuršių Nerija (Curonian Spit). *Baltica*, 16(1), p. 37–42.
- Greenwood, B., 2005. Bars. *Encyclopedia of Coastal Science*, ed. M. Schwartz. Dordrecht: Springer, p. 120–129.
- Greenwood, B., Davidson-Arnott, R. G. D., 1979. Sedimentation and Equilibrium in Wave-Formed Bars: A Review and Case Study. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 16, p. 312–332.
- Greenwood, B., Mittler, P. R., 1984. Sediment Flux and Equilibrium Slopes in a Barred Nearshore. *Marine Geology*, 60, p. 79–98.
- Greenwood, B., Sherman, D. J., 1984. Waves, Currents, Sediment Flux and Morphological Response in a Barred Nearshore System. *Marine Geology*, 60, p. 31–61.
- Hoefel, F., Elgar, S., 2003. Wave-Induced Sediment Transport and Sandbar Migration. *Science*, 299, p. 1885–1887.
- Hsu, T., Elgar, S., Guza, R. T., 2006. Wave-Induced Sediment Transport and Onshore Sandbar Migration. *Coastal Engineering*, 53, p. 817–824.
- Hunter R. E., Clifton H. E., Phillips R. L., 1979. Depositional Processes, Sedimentary Structures and Predicted Vertical Sequences in Barred Nearshore Systems, Southern Oregon Coast. *Journal of Sedimentary Petrology*, 49(3), p. 711–726.

- Jakimavičius, D., Kriauciūnienė, J., Šarauskienė, D., 2017. Assessment of Wave Climate and Energy Resources in the Baltic Sea Nearshore (Lithuanian Territorial Water). *Oceanologia*, 2017, p. 1- 12.
- Jarmalavičius, D., 2012. Kompleksiškumas Kuršių Nerijos Lietuvos dalies kranto sistemoje. *Geografijos metraštis*, 45, p. 17-28.
- Jarmalavičius, D., Pupienis, D., Žilinskas, G., 2014. Sea Level Fluctuation and Shoreline Evolution on Decadal Time Scale, Lithuanian Baltic Sea Coast. *Journal of Coastal Research*, SI 70, p. 164-169.
- Jarmalavičius, D., Satkūnas, J., Žilinskas, G., Pupienis, D., 2011. Dynamics of Beaches of the Lithuanian Coast (The Baltic Sea) for the Period 1993–2008 Based on Morphometric Indicators. *Environmental Earth Science*, 65 (6), p. 1727-1736.
- Kim, D. H., Sanchez-Arcilla, A., Caceres, I., 2017. Depth-Integrated Modelling on Onshore and Offshore Sandbar Migration: Revision of Fall Velocity. *Ocean Modelling*, 110, p. 21–31.
- King, C. A. M., Williams, W. W., 1949. The Formation and Movement of Sand Bars by Wave Action. *Geographical Journal*, 112, p. 70–85.
- Kirklys, V., 1974. Pietrytinės Baltijos jūros dalies litodinaminiai ir morfodinaminiai priekrantės bruožai. *Geografijos metraštis*, XIII, 217–228.
- Konicki, K. M., Holman, R. A., 2000. The Statistics and Kinematics of Transverse Sand Bars on an Open Coast. *Marine Geology*, 169, p. 69–10.
- Kuriyama, Y., 2002. Medium-Term Bar Behavior and Associated Sediment Transport at Hasaki, Japan. *Journal of Geophysical Research*, 107 (C9), p. 3132.
- Lapinskis, J., 2017. Coastal Sediment Balance in the Eastern Part of the Gulf of Riga (2005–2016). *Baltica*, 30(2), p. 87–95.
- Larson, M., Kraus, N. C., 1992. Dynamics of Longshore Bars. *Coastal Engineering*, 23, p. 2219–2232.
- Larson, M., Kraus, N.C., 1994. Temporal and Spatial Scales of Beach Profile Change, Duck, North Carolina. *Marine Geology*, 117, p. 75–94.
- Levoy, F., Anthony, E. J., Monfort, O., Robin, N., Bretel, P., 2013. Formation and Migration of Transverse Bars Along a Tidal Sandy Coast Deduced from Multi-Temporal Lidar Datasets. *Marine Geology*, 342, p. 39–52.
- Lietuvos Respublikos teritorijos M 1:10 000 skaitmeninis rastrinis ortofotografinis žemėlapis. 2005–2006. Nacionalinė žemės tarnyba prie ŽŪM.
- Lippmann, T. C., Holman, R. A., 1990. The Spatial and Temporal Variability of Sand Bar Morphology. *Journal of Geophysical Research*, 95 (C7), p. 11575–11575.
- Marino-Tapia, I. J., O'Hare, T. J., Russell, P. E., Davidson, M. A., Huntley, D. A., 2007. Cross-Shore Sediment Transport on Natural Beaches and Its Relation to Sandbar Migration Patterns: 2. Application of the Field Transport Parameterization. *Journal of Geophysical research*, 112, p. C03002.
- Masselink, G., Kroon, A., 2009. Morphology and Morphodynamics of Sandy Beaches. *Coastal Zones and Estuaries*, ed. F. Ignacio, O. Iribarne. Oxford: Eolss, p. 221–244.
- Masselink, G., Short, A. D., 1993. The Effect of Tide Range on Beach Morphodynamics and Morphology: A Conceptual Beach Model. *Journal of Coastal Research*, 9(3), p. 785–800.
- Mėžinė, J., Zemlys, P., Gulbinskas S., 2013. A Coupled Model of Wave-Driven Erosion for the Palanga Beach, Lithuania. *Baltica*, 26 (2), p. 169–176.
- Pape, L., Ruessink, B. G., 2008. Multivariate Analysis of Nonlinearity in Sandbar Behavior. *Nonlinear Processes Geophysics*, 15, p. 145–158.
- Plant N. G., Freilich M. H., Holman R. A., 2001. Role of Morphologic Feedback in Surf Zone Sandbar Response. *Journal of Geophysical Research*, 106 (C1): 973–989.
- Plant N. G., Holman, R. A., Freilich, M. H., Birkemeier, W. A., 1999. A Simple Model for Interannual Sandbar Behavior. *Journal of Geophysical Research*, 104, p. 15755–15776.
- Price, T. D., Ruessink, B. G., Castelle, B., 2014. Morphological Coupling in Multiple Sandbar Systems – A Review. *Earth Surface Dynamics*, 2, p. 306–321.
- Pruszk, Z., Rozynski, G., Zeidler, R. B., 1997. Statistical Properties of Multiple Bars. *Coastal Engineering*, 31, p. 263–280.
- Ribas F., Falques A., Garnier R., 2016. Nearshore Sand Bars. *Atlas of Bedforms in the Western Mediterranean*, eds. J. Guillén, J. Acosa, F.L. Chiocci, A. Palanques. Springer International Publishing, p.73-79.
- Ribas, F., Kroon, A., 2007. Characteristics and Dynamics of Surfzone Transverse Finger Bars. *Journal of Geophysical Research*, 112, p. F03028.

- Ruessink, B. G., Kroon, A., 1994. The Behaviour of a Multiple Bar System in the Nearshore Zone of Terschelling, the Netherlands: 1965-1993. *Marine Geology*, 121, p. 187-197.
- Ruessink, B. G., Pape, L., Turner, I. L., 2009. Daily to Interannual Cross-Shore Sandbar Migration: Observations from a Multiple Sandbar System. *Continental Shelf Research*, 29, p. 1663-1677.
- Ruessink, B. G., Van Enckevort, I. M. J., Kingston, K. S., Davidson, M. A., 2000. Analysis of Observed Two- And Three-Dimensional Nearshore Bar Behaviour. *Marine Geology*, 169, p. 161-183.
- Ruessink, G. B., Price, T., Castelle, B., 2013. Finite-Amplitude Behaviour of Alongshore Variability in Nearshore Sandbars: Observations and Modelling. *Coastal Dynamics Proceedings*, 2013, p. 1-14.
- Sallenger, A. H., Holman, R. A., 1987. Infragravity Waves Over a Natural Barred Profile. *Journal of Geophysical Research*, 92, p. 9531-9540.
- Sallenger, A. H., Howd, P. A., 1989. Nearshore Bars and the Breakpoint Hypothesis. *Coastal Engineering*, 12, p. 301-313.
- Shand, R. D., Bailey, D. G., Shephard, M. J., 1999. An Inter-Site Comparison of Net Offshore Bar Migration Characteristics and Environmental Conditions. *Journal of Coastal Research*, 15, p. 750-765.
- Shepard, F. P., 1950. Longshore Bars and Longshore Troughs. Beach Erosion Board, Technical Memo 15, p. 32.
- Short, A. D., 1975. Offshore Bars along the Alaskan Arctic Coast. *The Journal of Geology*, 83(2), p. 209-221.
- Short, A. D., 1979. Three Dimensional Beach Stage Model. *Journal of Geology*, 87, p. 553-571.
- Short, A. D., 1992. Beach Systems of the Central Netherlands Coast: Processes, Morphology and Structural Impacts in a Storm Driven Multi-Bar System. *Marine Geology*, 107, p. 103-137.
- Short, A. D., Aagaard, T., 1993. Single and Multi-Bar Beach Change Models. *Journal of Coastal Research*, 15, p. 141-157.
- Shuisky, Yu. D., 1982. Abrasional Processes of the Submarine Slope within Eastern Part of the Baltic Sea. *Baltica*, 7, p. 223 - 234.
- Smit, M., Reniers, A., Stive, M. J. F., 2010. What Determines Nearshore Sandbar Response? *Coastal Engineering Proceedings*, 32, p. 1-7.
- Smit, M., Reniers, A., Stive, M. J. F., 2012. Role of Morphological Variability in the Evolution of Nearshore Sandbars. *Coastal Engineering*, 69, p. 19 - 28.
- Thornton, E. B., Humiston, R. T., Birkemeier, W., 1996. Bar/Trough Generation on a Natural Beach. *Journal of Geophysical Research*, 101, p. 12097-12110.
- Van de Lageweg, W. I., Bryan, K. R., Coco, G., Ruessink, B. G., 2013. Observations of Shoreline-Sandbar Coupling on an Embayed Beach. *Marine Geology*, 344, p. 101-114.
- Van Enckevort, I. M. J., Ruessink, B. G., Coco, G., Suzuki, K., Turner, I. L., Plant, N. G., Holman, R. A., 2004. Observations of Nearshore Crescentic Sandbars. *Journal of Geophysical Research*, 109, p. C06028.
- Van Enckevort, I. M. J., Ruessink, B. G., 2003a. Video Observations of Nearshore Bar Behavior. Part 1: Alongshore Uniform Variability. *Continental Shelf Research*, 23, p. 501-512.
- Van Enckevort, I. M. J., Ruessink, B. G., 2003b. Video Observations of Nearshore Bar Behavior. Part 2: Alongshore Non-Uniform Variability. *Continental Shelf Research*, 23, p. 513-532.
- Walstra, D. J. R., Reniers, A. J. H. M., Ranasinghe, R., Roelvink, J. A., Ruessink, B. G., 2012. On Bar Growth and Decay During Interannual Net Offshore Migration. *Coastal Engineering*, 60, p. 190 - 200.
- Wijnberg, M. K., Kroon, A., 2002. Barred Beaches. *Geomorphology*, 48, p. 103 - 120.
- Wright, L. D., Short, A. D., 1984. Morphodynamic Variability of Surf Zones and Beaches: A Synthesis. *Marine Geology*, 56, p. 93-118.
- Žaromskis, R., 1974. Povandeninių sėklių reljefingumo klausimu (Kuršių nerijos jūros priekrantės pavyzdžiu). *Geografijos metraštis*, XIII, p. 229-235.
- Žaromskis, R., 2004. Priekrantės geomorfologija. *Ataskaita už projektą Baltijos jūros Lietuvos krantų geologinis atlasas*. Vilnius: Lietuvos geologijos tarnyba, p. 57-60.
- Žaromskis, R., Gulbinskas, S., 2010. Main Patterns of Coastal Zone Development of the Curonian Spit, Lithuania. *Baltica*, 23 (2), p. 19-156.
- Žilinskas, G., 2005. Trends in Dynamic Processes along the Lithuanian Baltic Coast. *Acta Zoologica Lituanica*, 15(2), p. 204-207.
- Žilinskas, G., Jarmalavičius, D., 2007. Interrelation of Morphometric Parameters of the Submarine Shore Slope of the Curonian Spit, Lithuania. *Baltica*, 20 (1-2), p. 46-52.

MORPHOLOGY OF CURONIAN SPIT NEARSHORE ZONE BARS

Rasa Janušaitė, Laurynas Jukna

Vilnius University, CHGF Institute of Geosciences, M. K. Čiurlionio str. 21, LT-03101 Vilnius

E-mail: rasa.janusaite@gmail.com; laurynas.jukna@gf.vu.lt

Summary

Nearshore bars can be described as sedimentary elongate underwater sand ridges shaped by waves and nearshore currents along wave-dominated coasts of open or semi-enclosed seas, oceans and large lakes with sufficient sand budget (Brander 2004; Bird, 2008; Pape, Ruessink, 2008; Ruessink et al., 2013; Price et al., 2014). Sandbar importance in processes of nearshore morphodynamic system has attracted nearshore researchers to carry out intensive field and laboratory studies of these morphological features since the middle of 20th century. Despite considerable efforts in this study field, processes controlling bar formation as well as their spatial variability are not completely understood, and universal classification of distinctive bar types remain a challenge for nearshore geomorphologists. The lack of nearshore bar investigation is also notable in Lithuanian field of coastal science since no detailed and continuous research on nearshore bars of Lithuanian Baltic sea coast has been fulfilled, previous investigations are mostly fragmented. For this reason, the main goal of this article is to broaden this field of study by evaluating morphological and typological structure of nearshore bars in the Baltic sea coast of Curonian Spit.

In order to create methodological guidelines for a study of Curonian Spit sandbars, a review of existing bar generation hypotheses and classification of nearshore bars was presented. To explain bar generation, three groups of hypotheses have been introduced, all including mechanisms of convergence of sediment. These mechanisms combine break-point hypothesis, which explain bar generation through onshore and offshore directed sediment flows, converged somewhere around break-point of waves, infragravity wave hypothesis which relates bar formation with long low frequency standing waves, causing convergent pattern of drift velocities, and self-organization hypothesis, explaining bar generation through interaction of nonlinear feedbacks between sea bottom morphology and hydrodynamic processes. Various morphological studies of nearshore bars revealed four main types of these geomorphological structures based on two criteria: their orientation and plan view shape. On the first classification level, longshore bars, which are shore-parallel, are distinguished from transverse bars, which have oblique orientation. On the second level, longshore bars might be classified into two-dimensional longshore bars with no longshore variability (straight) and three-dimensional or crescentic bars which are longshore variable (non-straight), whereas transverse bars might be divided into short, wide crested shore-attached bars, related to previous existence of crescentic bar, and long, narrow crested transverse finger bars.

Concerning evaluation of morphological features of Curonian Spit nearshore bars, morphometric and typological structure of these underwater sand ridges was analysed. As a result of morphometric analysis, morphological bar regionalization was introduced. It was found that the nearshore of Baltic sea coast in the Curonian Spit is composed of six distinct bar sectors characterized by different bar zone width, number and size of bars. The nearshore of northern part of Curonian Spit is represented by narrow bar zone with 390 – 480 m average bar zone width in the first three bar sectors, variable number of bars and quite small bars, while the southern part of Curonian Spit is characterized by wider bar zone (470 – 610 m wide on average in the last three bar sectors), relatively smaller and more stable number of bars (mostly 3) and larger bars, especially large-sized outer bar with wide and deep trough which reaches up to 8.5 m depth.

Based on previously presented classification of nearshore bars, bar types in the Curonian Spit were distinguished and their spatial variability was analysed. Two-dimensional longshore, three-dimensional longshore and shore-attached (transverse) bars appeared in the nearshore of Curonian Spit which is characterized by a multiple bar system with 2 – 7 bars. Three-dimensional longshore and shore-attached bars in the Curonian Spit are outlined by irregular, non-rhythmic structure with variously sized horns and irregular shapes. The outer bar is usually two-dimensional longshore (straight) with slightly undulating structure in the first bar sector. The second most seaward positioned bar is also two-dimensional longshore, except the northern part of the Curonian Spit and some short segments more south, where its type changes to three-dimensional with 70 – 450 m distance between consecutive horns. The inner bars normally are three-dimensional longshore with 50 – 450 m distance between horns or shore-attached with 40 – 350 m distance separating their obliquely orientated crests.