Rasa Janušaitė, Gamtos tyrimų centras

PALYDOVINIŲ VAIZDŲ PANAUDOJIMAS KURŠIŲ NERIJOS JŪROS PRIEKRANTĖS SĖKLIŲ TYRIMUOSE: METODINIAI ASPEKTAI IR TAIKYMO PAVYZDŽIAI

Anotacija

Šiame tyrime pasiūlyta priekrantės sėklių identifikavimo ir dinamikos analizės metodika, panaudojant optinius palydovinius vaizdus. Ji buvo pritaikyta sėklių vertinimui Kuršių nerijos Lietuvos dalies Baltijos jūros priekrantėje, kuris apėmė: sėklių migraciją statmenai kranto pagal skirtingas laiko skales ir jos cikliškumą, sėkliams būdingo morfodinaminio reiškinio – persirikiavimo lokalizavimą ir šio reiškinio ryšį su kranto kaita. Gauti rezultatai parodė netolygią sėklių raidą išilgai Kuršių nerijos jūros kranto, jų svarbą kranto raidai ir atskleidė palydovinių vaizdų panaudojimo galimybes šių povandeninių formų tyrimuose.

Abstract

This study proposes a methodology for the identification and temporal analysis of nearshore sandbars in optical satellite imagery. The suggested methodology was applied to the evaluation of nearshore sandbar behaviour in the Lithuanian part of the Curonian Spit, including sandbar cross-shore migration on different time scales; net offshore migration; sandbar switching occurrence; and the relationship between sandbar switching episodes and subaerial beach evolution. Study results revealed alongshore variable sandbar behaviour in the Curonian Spit, underscored the significance of nearshore sandbars in coastal evolution, and demonstrated the capabilities of optical satellite remote sensing in nearshore sandbar studies.

Raktiniai žodžiai: priekrantės morfodinamika, nuotolinis stebėjimas, įjūrinės migracijos ciklas, sėklių persirikiavimas, Baltijos jūra, „PlanetScope“, „RapidEye“.

Keywords: nearshore morphodynamics, remote sensing, net offshore migration, sandbar switching, Baltic Sea, PlanetScope, RapidEye.

ĮVADAS

Vėjo sukeltos bangos ir priekrantės srovės – pagrindiniai hidrodinaminiai veiksniai, lemiantys kranto eroziją ir akumuliaciją bepotvyniuose krantuose (Splinter ir kt., 2018). Jų veikla glaudžiai susijusi su priekrantės dugno morfologija (Robin ir kt., 2014). Tarp jūros ir kranto nuolat vyksta smėlio apykaita (Aagaard ir kt., 2004; Cohn ir kt., 2017). Pokyčiai paplūdimyje ir kopagūbryje neatsiejami nuo procesų, vykstančių sekliojoje jūros priekrantėje.

Vienas pagrindinių priekrantės dugną apibūdinančių reljefo elementų – priekrantės sėkliai. Tai bangų ir priekrantės srovių formuojami povandeniniai smėlio gūbriai, aptinkami jūrų, vandenynų ir didelių ežerų krantuose (iki 10 m gylyje), pasižymintys didele formų ir dydžių įvairove (Wijnberg, Kroon, 2002; Price ir kt., 2014; Rutten ir kt., 2018). Priekrantės sėklių aukštis gali varijuoti nuo keliasdešimties centimetrų iki šešių metrų, o ilgis – nuo keliasdešimties metrų iki keliasdešimties kilometrų ar daugiau (Wijnberg, Kroon, 2002). Jų planinis vaizdas varijuoja nuo krantui lygiagrečių ir tiesių iki išlenktos pusmėnulio formos su prie kranto prisišliejusiais pasikartojančiais ragais (Wright, Short, 1984). Priekrantės sėkliai migruoja – tiek statmenai (Van Enckevort, Ruessink, 2003 a), tiek išilgai kranto (Van Enckevort, Ruessink, 2003 b) ir pasižymi įvairia morfodinamine elgsena (Wright, Short, 1984; Shand ir kt., 2001; Price ir kt., 2014).

Išsamūs priekrantės sėklių dinamikos ir morfologijos tyrimai pradėti vykdyti dar XX a.

viduryje (Shepard, 1950), tačiau jų kiekis neprilygsta kranto tyrimų skaičiui. Vis dar nesutariama dėl sėklių susidarymą lemiančių procesų (Do ir kt., 2021), jų migraciją kranto link varančio mechanizmo (Grossmann ir kt., 2023), vis dar trūksta žinių apie šių formų sąveiką su krantu (Tătui ir kt., 2013) ir ilgalaikius jų dinamikos bruožus ilguose (>10 km) priekrantės ruožuose (Gijsman ir kt., 2021). Nepakankamas sėklių ištirtumas susijęs su ilgalaikių nuoseklių duomenų apie priekrantės dugno reljefą trūkumu (Tătui, Constantin, 2020). Tai lemia laiko ir finansiniams ištekliams imlūs tradiciniai priekrantės sėklių matavimo metodai, kuriems dar reikia ir palankių hidrometeorologinių sąlygų (Gao, 2009; Román-Rivera, Ellis, 2019).

XX a. paskutinįjį dešimtmetį priekrantės sėklių tyrimams pasiūlyta stebėsenos vaizdo kameromis alternatyva. Ji pagrįsta priekrantės sėklių viršūnės padėtimi, identifikuojama ilgo išlaikymo nuotraukose (Lippmann, Holman, 1990). Šis duomenų surinkimo būdas svariai prisidėjo prie priekrantės sėklių morfodinamikos pažinimo (Van Enckevort, Ruessink, 2003 b; Price, Ruessink, 2011; Melito ir kt., 2020), tačiau jis tinka tik kelių kilometrų ilgio priekrantės ruožų stebėsenai, taip pat jam reikalinga speciali įranga ir nuolatinė jos priežiūra (Holman, Stanley, 2007).

Nuo XX a. antrosios pusės į orbitą paleidžiama vis daugiau palydovų ir jau ne vieną dešimtmetį fiksuojami Žemės paviršiaus vaizdai, kurių gerėjanti erdvinė bei laikinė skiriamoji geba sukuria prielaidas ilgų kranto ruožų būklės stebėsenai mažais kaštais (Teodoro, 2016). Palydovinių vaizdų naudą krantų geomorfologijoje atskleidžia jau ne vieną dešimtmetį atliekami kranto linijos identifikavimo ir pokyčių optiniuose palydoviniuose vaizduose tyrimai, prisidėję prie lokalių (Acharya ir kt., 2018; Vos ir kt., 2019; Castelle ir kt., 2021) ir globalių (Vos ir kt., 2023) kranto linijos pokyčių pažinimo. Tačiau tyrimai, skirti povandeniniam priekrantės dugno reljefui pažinti, tokia gausa nepasižymi. Vis dar trūksta metodų, kurie būtų pritaikyti priekrantės sėklių tyrimams naudojant palydovinius vaizdus ir leistų išnaudoti visas jų teikiamas galimybes.

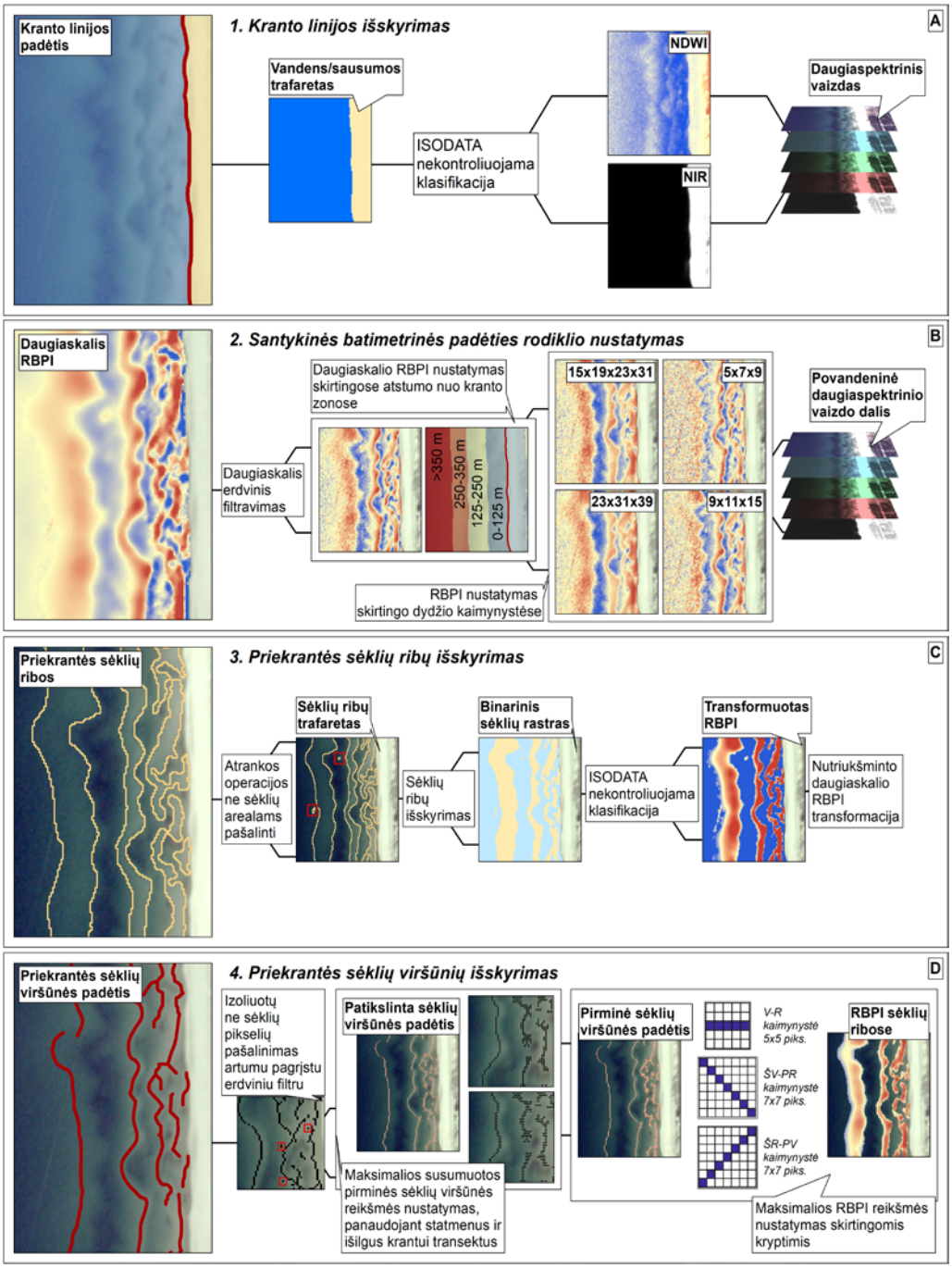
Šis tyrimas vyko Baltijos jūros priekrantės Kuršių nerijos Lietuvos dalyje. Juo siekta sukurti priekrantės sėklių identifikavimo ir analizės palydoviniuose vaizduose metodologiją bei atskleisti jos galimybes. Straipsnyje panaudota jau publikuota medžiaga skirta sėkliams palydoviniuose vaizduose identifikuoti (Janušaitė ir kt., 2022) ir jų dinamikos analizei (Janušaitė ir kt., 2022) bei persirikiavimo reiškiniui tirti (Janušaitė ir kt., 2023).

METODIKA

Tyrimų teritorija. Tyrimai atlikti Kuršių nerijos Lietuvos dalies Baltijos jūros priekrantėje, kuriai būdinga iš 2–4 sėklių sudaryta sistema, besiformuojanti 340–700 m pločio sėklių zonoje iki 8 m gylyje.

Duomenys. Tyrimams naudoti 145 datų „RapidEye“ (5 m) ir „PlanetScope“ (3 m) optinių daugiaspektrių palydovinių jutiklių vaizdai, užfiksuoti 2009–2021 m. regimojo ir artimojo infraraudonojo spektro diapazone. Pasiūlytos metodikos tikslumui vertinti panaudoti šešių datų batimetrinių matavimų duomenys, surinkti 2017–2020 m. 17 skersinių pjūvių, išsidėsčiusių išilgai Kuršių nerijos Baltijos jūros priekrantės kas 1–5 km.

Priekrantės sėklių identifikavimo palydoviniuose vaizduose metodika. Regimojo spektro šviesa seklioje jūros priekrantėje prasiskverbia pro vandens paviršių, todėl priekrantės sėkliai matomi palydoviniuose regimojo spektro kanalų vaizduose. Remiantis šia ypatybe priekrantės sėkliams palydoviniuose vaizduose išskirti pasiūlytas automatizuotas geografinės informacinės sistemos (GIS) priemonėmis pagrįstas algoritmas (Janušaitė ir kt., 2021), sudarytas iš keturių pagrindinių veiksmų blokų, skirtų skirtingoms šių smėlio gūbrių morfologinėms charakteristikoms identifikuoti. Pagrindiniai kiekvieno veiksmų bloko įgyvendinimo žingsniai pavaizduoti 1 pav. Pasiūlytas algoritmas sukurtas taip, jog išskiriant sėklius būtų išsaugota visa jų formų bei dydžių įvairovė ir išsprendžiamos palydoviniuose vaizduose



1 pav. Priekrantės sėklių identifikavimo palydoviniuose vaizduose algoritmo pagrindiniai veiksmų blokai: kranto linijos padėties išskyrimas (A), daugiaskalio santykinio batimetrinės padėties rodiklio nustatymas (B), priekrantės sėklių ribų išskyrimas (C), priekrantės sėklių viršūnių padėties nustatymas (D) (pagal Janušaitė ir kt., 2021)

Fig. 1. The main implementation stages of an algorithm for the identification of nearshore sandbars in optical satellite imagery: shoreline extraction (A), calculation of a multiscale relative bathymetric position index (B), sandbar extraction (C), and sandbar crest extraction (D) (based on Janušaitė et al., 2021)

keliamos problemos, apsunkinančios sėklių išskyrimą. Įgyvendinus 1 pav. pavaizduotus veiksmų blokus, gaunami sluoksniai su kranto linijos padėtimi, daugiaskaliu santykinės batimetrinės padėties rodikliu (angl. *Relative Bathymetric Position Index*, RBPI), reprezentuojančiu teigiamas ir neigiamas priekrantės reljefo formas, priekrantės sėklių ribomis ir viršūnėmis. Šių sluoksnių laiko eilutės gali būti naudojamos įvairių sėklių dinamikos dedamųjų analizėms, kurių pavyzdžiai dar bus aptariami. Metodika įgyvendinta ir visos žemiau aptartos analizės atliktos naudojant „ArcGIS“ programinę įrangą ir R programavimo kalbą.

Priekrantės sėklių migracijos pagal skirtingas laiko skales vertinimo metodika. Vienas pagrindinių sėklių dinamiką apibūdinančių elementų yra migracija kranto ir jūros link. Jos greičiui pagal skirtingas laiko skales vertinti olandų mokslininkai pasiūlė sėklių viršūnės padėties laiko eilutėmis, nustatytomis pagal stebėsenos vaizdo kameromis duomenis, pagrįstą metodiką (Van Enckevort, Ruessink, 2003 a). Ji pritaikyta priekrantės sėklių viršūnių padėčių laiko eilutėms, nustatytoms palydoviniuose vaizduose, vertinant migracijos skersai kranto greičius pagal tarpmetinę ir sezoninę laiko skales (Janušaitė ir kt., 2022). Sezoninė laiko skalė padalyta į didelės ir mažos bangų energijos sezonus, kuriems atitinkamai priskirti spalio–kovo ir balandžio–rugsėjo mėn. Vertinimui naudoti mėnesiniai duomenys, kurie analizuoti išilgai Kuršių nerijos jūros priekrantės 1 071 statmenuose krantui priekrantės profiliuose, išsidėsčiusiuose kas 50 m. Atliekant sėklių migracijos skersai kranto vertinimą, jiems priskirti eilės numeriai pagal padėtį sėklių sekoje, kai pirmas – toliausiai nuo kranto esantis sėklius (įjūrinis).

Priekrantės sėklių įjūrinės migracijos ciklo vertinimo metodika. Per pastaruosius tris dešimtmečius nusistovėjo suvokimas, kad daugumos priekrantės sėklių sistemų raidai būdingas įjūrinės migracijos ciklo modelis. Jis rodo, kad netoli kranto susiformavę sėkliai pagal daugiametę laiko skalę palaipsniui tolsta nuo kranto, kol galiausiai išsisklaido ir išnyksta iš priekrantės profilio (Ruessink, Kroon, 1994; Ruessink ir kt., 2003; Price ir kt., 2016; Walstra ir kt., 2016). Įprastai šis ciklas vertinamas remiantis batimetrinių profilių laiko eilute ir kompleksine empirinių ortogonalių funkcijų analize (angl. *Complex Empirical Orthogonal Function Analysis,* CEOF) (Ruessink ir kt., 2003). Šiame tyrime batimetrinių profilių laiko eilutė pakeista daugiaskalio RBPI rodiklio profilių laiko eilute, kuriai prieš atliekant CEOF analizę (Ruessink ir kt., 2003) pritaikyti papildomi duomenų filtravimo ir paruošimo analizei žingsniai, o jų poreikį nulėmė palydovinių vaizdų specifika (Janušaitė ir kt., 2022). Atlikus įjūrinės migracijos ciklo vertinimą, nustatyta sėkliaus ciklo pasikartojimo rodiklio trukmė (angl. *bar cycle return period*), kuri parodo laiko tarpą tarp dviejų sėkliaus degeneracijų (Ruessink ir kt., 2003), sėklių atstumas nuo kranto bei jų skaičius įjūrinio sėkliaus degeneracijos stadijoje ir sėklių zonos, kurioje vyksta aktyvūs pokyčiai, plotis.

Priekrantės sėklių persirikiavimo zonų identifikavimo ir vertinimo metodika. Priekrantės sėklių persirikiavimas (angl. *sandbar switching*) yra iš kelių sėklių sudarytoms sistemoms būdingas morfodinaminis reiškinys, kai išilgai kranto sėklius praranda vientisumą, o atitrūkęs jo galas prisišlieja prie kito toliau ar arčiau kranto esančio sėkliaus (Wijnberg ir Wolf, 1994; Shand ir kt., 2001). Optiniuose palydoviniuose vaizduose matomas priekrantės sėklių planinis vaizdas leidžia nesunkiai identifikuoti priekrantės sėklių persirikiavimo zonas ir stebėti jų raidos eigą. Jos apibrėžtos kaip priekrantės zonos, kuriose sėklių morfologinė forma paveikta jų persirikiavimo, tęsiasi po 500 m į šiaurę ir pietus nuo taško, kuriame vienas sėklius prišliejęs prie kito. Kiekvienoje persirikiavimo zonoje fiksuojamas sėklių atstumas nuo kranto persirikiavimo epizodo metu, jo trukmė ir morfologinis tipas (Janušaitė ir kt., 2023).

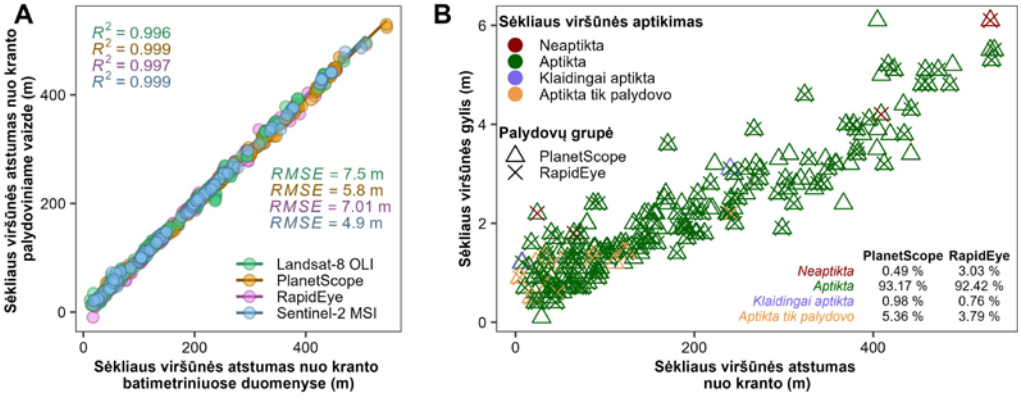
Priekrantės sėklių dinamikos ir kranto kaitos ryšio vertinimo metodika. Kadangi

priekrantės sėkliams persirikiavus pakinta nusistovėję priekrantės hidrodinamikos ir litodinamikos ypatumai, jie daro įtaką smėlio apykaitai tarp kranto ir priekrantės. Siekiant nustatyti, ar egzistuoja ryšys tarp pokyčių krante ir priekrantėje sėklių persirikiavimo epizodų metu, buvo vertinami kranto linijos padėties ir smėlio kiekio krante (paplūdimyje ir kopagūbryje) pokyčiai, atliekama priekrantės sėklių atstumo nuo kranto ir kranto linijos padėties persirikiavimo zonose tiesinė regresinė analizė, naudojami smėlio kiekio pokyčių krante vidurkio ir medianos persirikiavimo zonose ir už jų ribų palyginimui skirti statistiniai testai (Janušaitė ir kt., 2023).

TYRIMŲ REZULTATAI

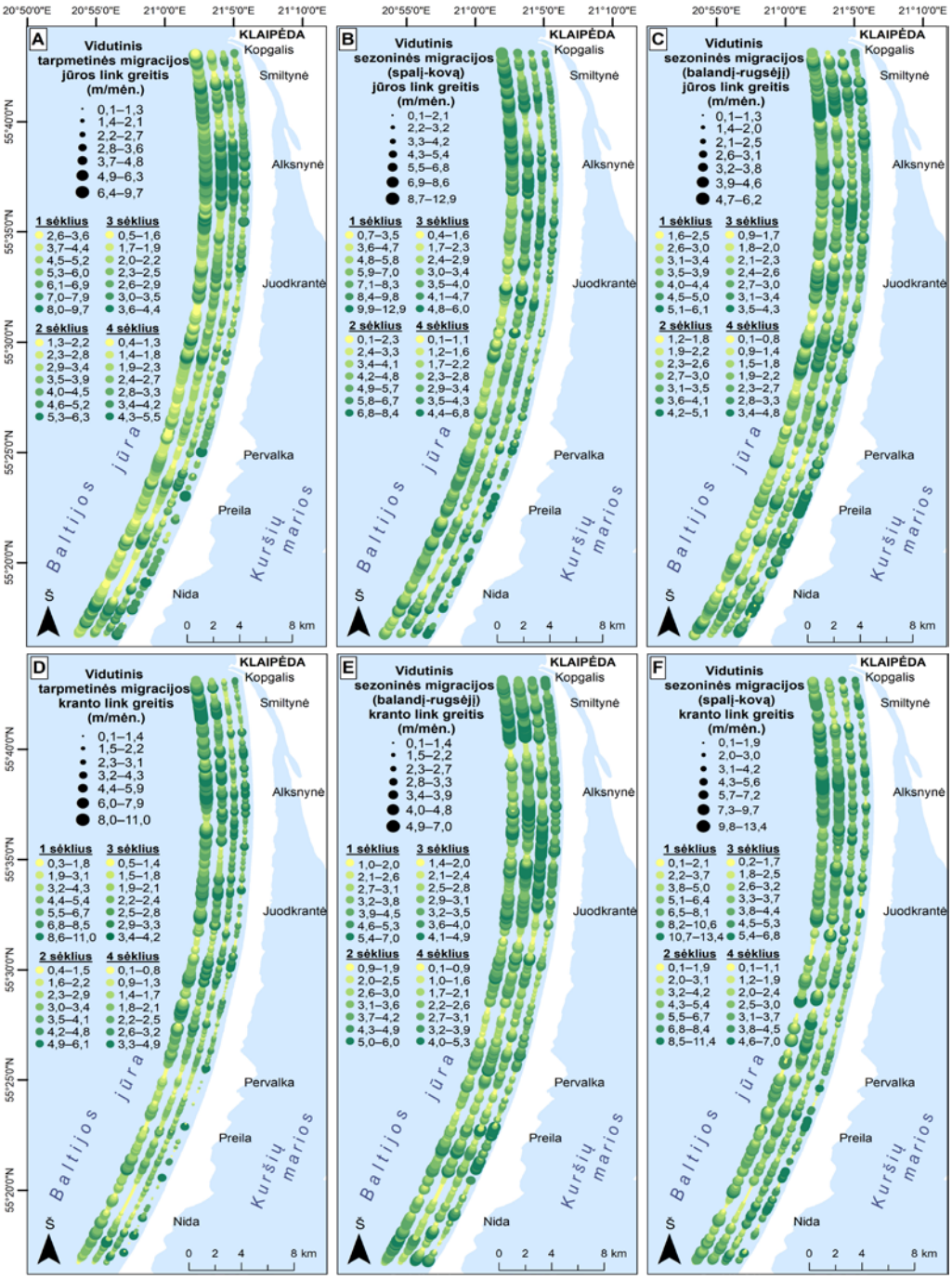
Pasiūlytos metodikos duomenų tikslumas. Siekiant įvertinti duomenų, gautų įgyvendinus pasiūlytą algoritmą, tikslumą ir tinkamumą analizei, priekrantės sėklių viršūnių padėtis, nustatyta palydoviniuose „RapidEye“ ir „PlanetScope“ vaizduose, buvo palyginta su jų padėtimi, remiantis batimetrinių matavimų duomenimis. Tyrimas parodė, kad priekrantės sėklių viršūnių padėtis palydoviniuose „PlanetScope“ (3 m) ir „RapidEye“ (5 m) vaizduose buvo nustatoma atitinkamai su 5,8 ir 7 m vidutine kvadratine paklaida (2 a pav.) (Janušaitė ir kt., 2021). Sėkliaus viršūnės padėties tikslumas priklausė nuo jo gylio ir atstumo nuo kranto, nuo formos išraiškingumo ir hidrodinaminių sąlygų vaizdo fiksavimo metu bei kokybinių vaizdo charakteristikų. Tiksliausiai nustatyta įkrantinių sėklių viršūnių padėtis, o mažiausiai tiksliai – įjūrinių. Pasiūlytas algoritmas sėklių viršūnių neidentifikavo tik tais atvejais, kai sutapo šie veiksniai: sėklius buvo neryškios išlėkštėjusios formos, o jo viršūnės gylis viršijo 6 m (2 b pav.). Šie rezultatai gauti remiantis palydoviniais vaizdais, kurių fiksavimo metu reikšmingas bangų aukštis neviršijo 0,7 metro.

Šis metodas išbandytas ir nagrinėjant nemokamai platinamus palydovinius „Sentinel-2“ MSI (10 m) ir „Landsat-8“ OLI (15 m) vaizdus, kuriuose priekrantės sėklių viršūnių padėtis buvo nustatoma atitinkamai su 4,5 ir 7,5 m vidutine kvadratine paklaida (2 a pav.). Nors „Sentinel-2“ ir „Landsat-8“ vaizdai pasižymi prastesne erdvine skiriamąja geba, juose priekrantės sėklių viršūnių padėtis identifikuojama su panašia paklaida, kaip ir „RapidEye“ bei „PlanetScope“ vaizduose. Tai



2 pav. A – pasiūlytu metodu palydoviniuose vaizduose identifikuojamos priekrantės sėklių viršūnių padėties palyginimas su jų padėtimi, nustatyta remiantis batimetrinių matavimų duomenimis; B – pasiūlyto metodo gebėjimo aptikti priekrantės sėklių viršūnes palydoviniuose vaizduose priklausomybė nuo gylio (pagal Janušaitė ir kt., 2021)

Fig. 2. A – the comparison between satellite-derived and bathymetry-derived sandbar crest positions; B – the depth-dependence of the ability of the method proposed in this study to detect sandbar crest in satellite images (based on Janušaitė et al., 2021)

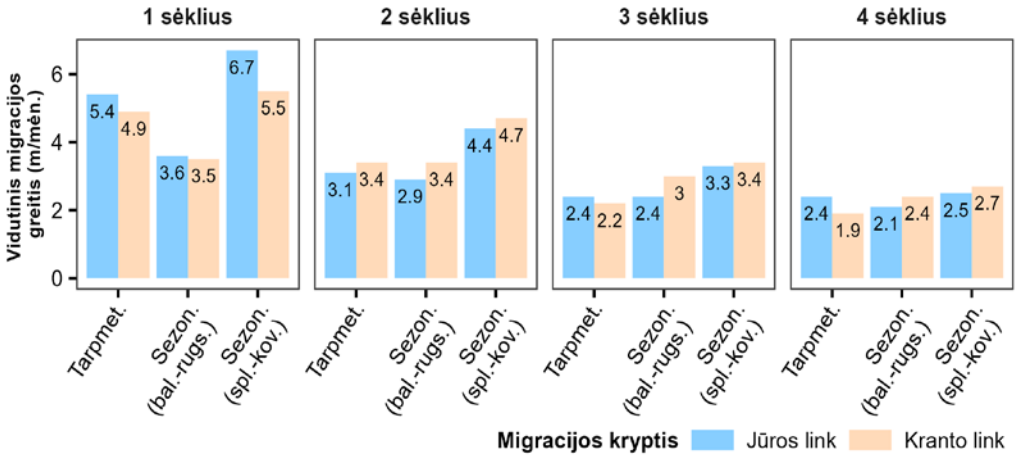


3 pav. Vidutinis priekrantės sėklių migracijos statmenai kranto greitis analizuotuose profiliuose pagal skirtingas laiko skales. Viršuje (A, B, C) pavaizduotas migracijos jūros link, o apačioje (C, D, E) – migracijos kranto link greitis. Žemėlapiuose arčiausiai kranto pavaizduotas ketvirto sėkliaus migracijos greitis, o toliausiai – pirmo (įjūrinio) (pagal Janušaitė ir kt., 2022)
Fig. 3. Average rates of sandbar cross-shore migration per profile on different time scales. The upper panels illustrate sandbar offshore migration, and the lower panels illustrate onshore migration. The rates of the fourth sandbar are depicted closest to the shoreline, and the rates of the first (outer) sandbar are the farthest (based on Janušaitė et al., 2022)

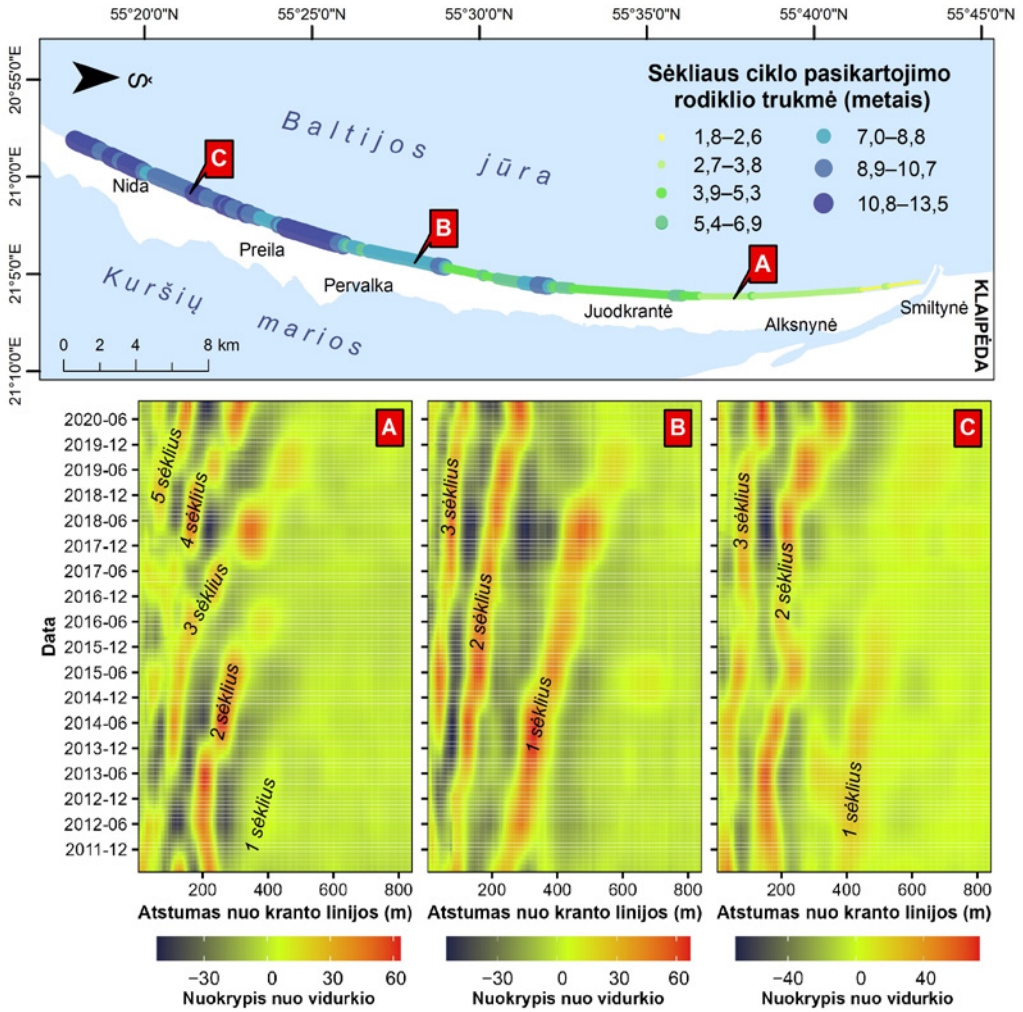
galima sieti su geresnėmis „Sentinel-2“ bei „Landsat-8“ jutiklių kokybinėmis charakteristikomis (Houborg, McCabe, 2018).

Sėklių migracijos skirtingose laiko skalėse vertinimo rezultatai. Šis vertinimas pagrįstas pasiūlyto algoritmo nustatytu rodikliu – sėklių viršūnių padėties laiko eilute palydoviniuose vaizduose. Tyrimo rezultatai rodo, kad Kuršių nerijos jūros priekrantės sėklių 1 071 profilyje vidutinis migracijos skersai kranto greitis siekė 0,1–13,4 m/mėn., priklausomai nuo laiko skalės, migracijos krypties ir sėkliaus padėties jų sekoje (3 pav.) (Janušaitė ir kt., 2022). Pagal tarpmetinę laiko skalę sėkliai vidutiniškai migravo iki 11 m/mėn. greičiu (3 a, d pav.), didelės bangų energijos sezono metu – iki 13,4 m/mėn. (3 b, f pav.), o mažos bangų energijos sezono metu – iki 7 m/mėn. (3 c, e pav.). Didžiausiu vidutiniu migracijos skersai kranto greičiu pagal visas laiko skales pasižymėjo pirmas (įjūrinis) sėklius, o mažiausiu vidutiniu – įkrantiniai trečias ir ketvirtas sėkliai (3 pav.). Pagal tarpmetinę laiko skalę 2/3 priekrantės profilių visų sėklių vidutinis migracijos jūros link greitis viršijo migracijos kranto link greitį. Pagal sezoninę laiko skalę mažos bangų energijos sezono metu antras–ketvirtas sėkliai pasižymėjo didesniu vidutiniu migracijos kranto link negu jūros link greičiu kiek daugiau nei pusėje priekrantės profilių, o pirmasis – beveik identišku migracijos jūros ir kranto link vidutiniu greičiu didžiojoje profilių dalyje. Apie 2/3 analizuotų priekrantės profilių didelės bangų energijos sezono metu pirmas sėklius pasižymėjo didesniu vidutiniu migracijos jūros link greičiu, o likę sėkliai vidutiniškai migravo sparčiau kranto link kiek daugiau negu pusėje priekrantės profilių. Pagal visas laiko skales šiaurinė Kuršių nerijos dalis (nuo Kopgalio iki Juodkrantės) pasižymėjo didesniu vidutiniu migracijos skersai kranto greičiu negu pietinė (3 pav.).

Priekrantės profiliuose pagal skirtingas laiko skales palyginus vidutinį sėklių migracijos greitį jūros link pastebėta, kad didesnėje profilių dalyje sezono metu didelės bangų energijos migracija yra sparčiausia, tarpmetinė kiek lėtesnė, o mažos bangų energijos migracija sezonu metu – lėčiausia (4 pav.). Migracijos kranto link atveju didesnėje profilių dalyje didelės bangų energijos migracija sezono metu taip pat sparčiausia, tačiau antro–ketvirto sėklių mažos bangų energijos migracija sezono metu buvo spartesnė negu tarpmetinė šių sėklių migracija kranto link (4 pav.). Tai leidžia daryti keletą prielaidų: 1) didžiausi sėklių padėties pasikeitimai Kuršių nerijoje vyksta spalio–kovo mėn., kada



4 pav. Vidutiniai priekrantės sėklių migracijos greičiai visuose analizuotuose profiliuose 2009–2021 m. pagal skirtingas laiko skales (tarpmet. – pagal tarpmetinę, sezon. (bal.–rugs.) – pagal sezoninę balandžio–rugsėjo mėnesiais, sezon. (spl.–kov.) – pagal sezoninę spalio–kovo mėnesiais)
Fig. 4. Averaged nearshore sandbar cross-shore migration rates for all profiles in 2009–2021 on different time scales

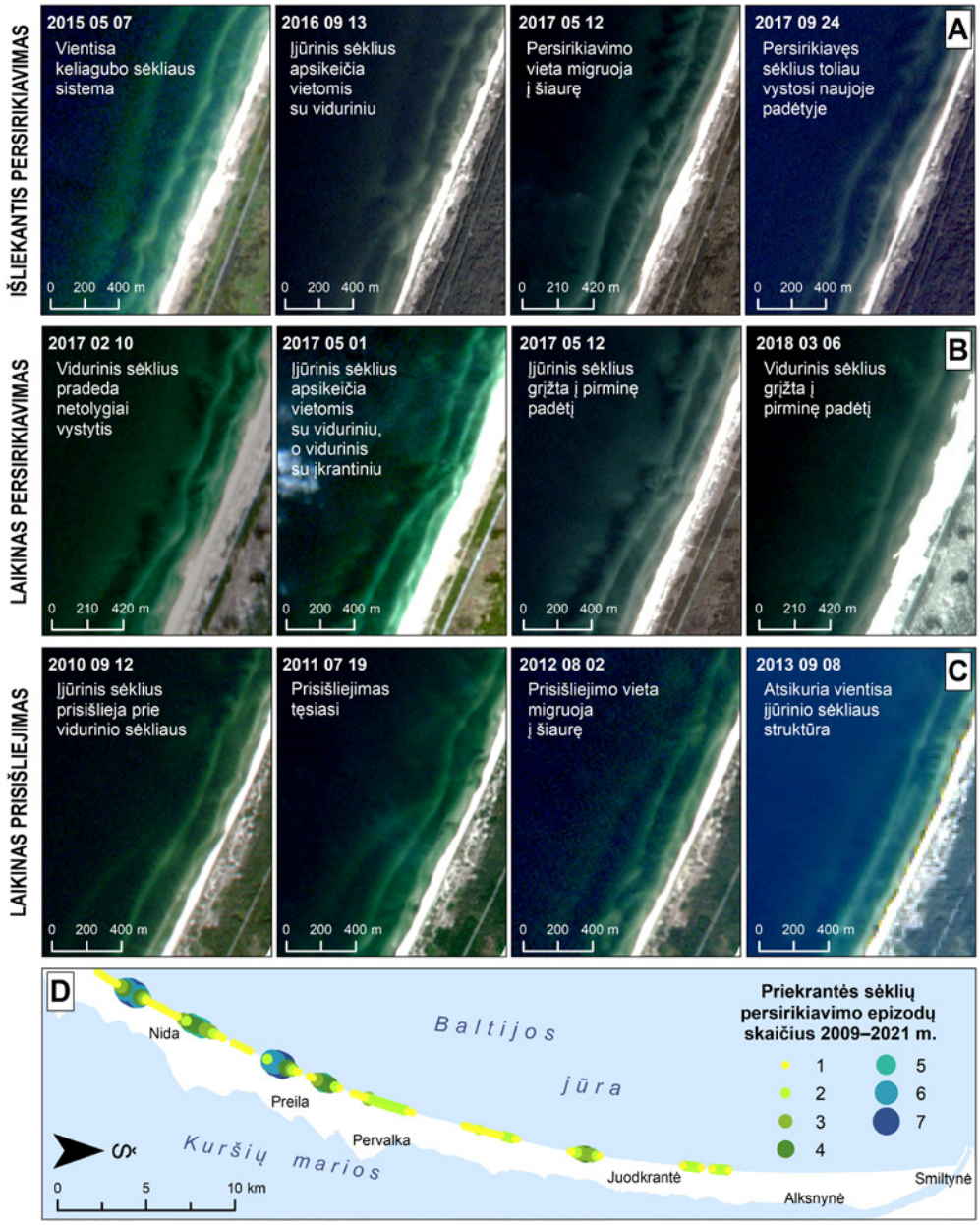


5 pav. Sėkliaus ciklo pasikartojimo rodiklio trukmė Kuršių nerijos Lietuvos dalies Baltijos jūros priekrantėje (viršuje) ir RBPI rodiklio perturbacijų laiko ir erdvės žemėlapių pavyzdžiai (apačioje), kuriuose stebimi įjūriniam migracijos ciklui būdingi bruožai. A, B, C – perturbacijų žemėlapių pavyzdžių vietos (pagal Janušaitė ir kt., 2022)

Fig. 5. The duration of the bar cycle return period along the nearshore of the Curonian Spit with examples of time-space maps of RBPI perturbations where cyclic offshore-directed sandbar behavior is observed. A, B, C – locations of examples of the perturbation maps (based on Janušaitė et al., 2022)

bangų energijos lygis yra didžiausias; 2) tarpmetinė laiko skalė yra svarbesnė migracijai jūros link negu migracijai kranto link; 3) sezoninė laiko skalė yra svarbesnė arčiau kranto esantiems sėkliams, o jiems tolstant nuo kranto didėja tarpmetinės laiko skalės svarba. Tai reiškia, kad arčiau kranto esantys sėkliai gali per sezoną daug migruoti, tačiau šie jų padėties svyravimai ilgesniu laikotarpiu nėra reikšmingi.

Įjūrinės migracijos ciklo vertinimo rezultatai. Šis vertinimas pagrįstas palydoviniuose vaizduose pasiūlyto algoritmo nustatytu rodikliu – RBPI rodiklio profilių laiko eilute. Ja pagrįsti tyrimo rezultatai rodo, kad Kuršių nerijos jūros priekrantės sėkliams būdinga cikliška jūros link nukreipta elgsena. Tai patvirtina, kad šių povandeninių gūbrių raidai Kuršių nerijoje būdingi įjūrinės migracijos ciklo bruožai (Ruessink, Kroon, 1994) –



6 pav. Kuršių nerijai būdingų priekrantės sėklių persirikiavimo morfologinių tipų pavyzdžiai (A–C) ir 2009–2021 m. užfiksuotų persirikiavimo epizodų susidarymo vietos (D) (pagal Janušaitė ir kt., 2023)
Fig. 6. Examples of sandbar switching morphological types in the Curonian Spit (A–C) and locations of sandbar switching occurrence in 2009–2021 (D) (based on Janušaitė et al., 2023)

pradžioje jie susiformuoja nedideliu atstumu nuo kranto, o tada migruoja tiek jūros, tiek kranto link. Pagal daugiametę laiko skalę jie palaipsniui tolsta nuo kranto, o kai jų viršūnės pasiekia 250–700 m (vidutiniškai 472 m) nuo kranto – sunyksta (šiaurinėje nerijos dalyje pasiekę mažiausią atstumą, o ties Juodkrante ir į pietus nuo jos – didžiausią) (Janušaitė

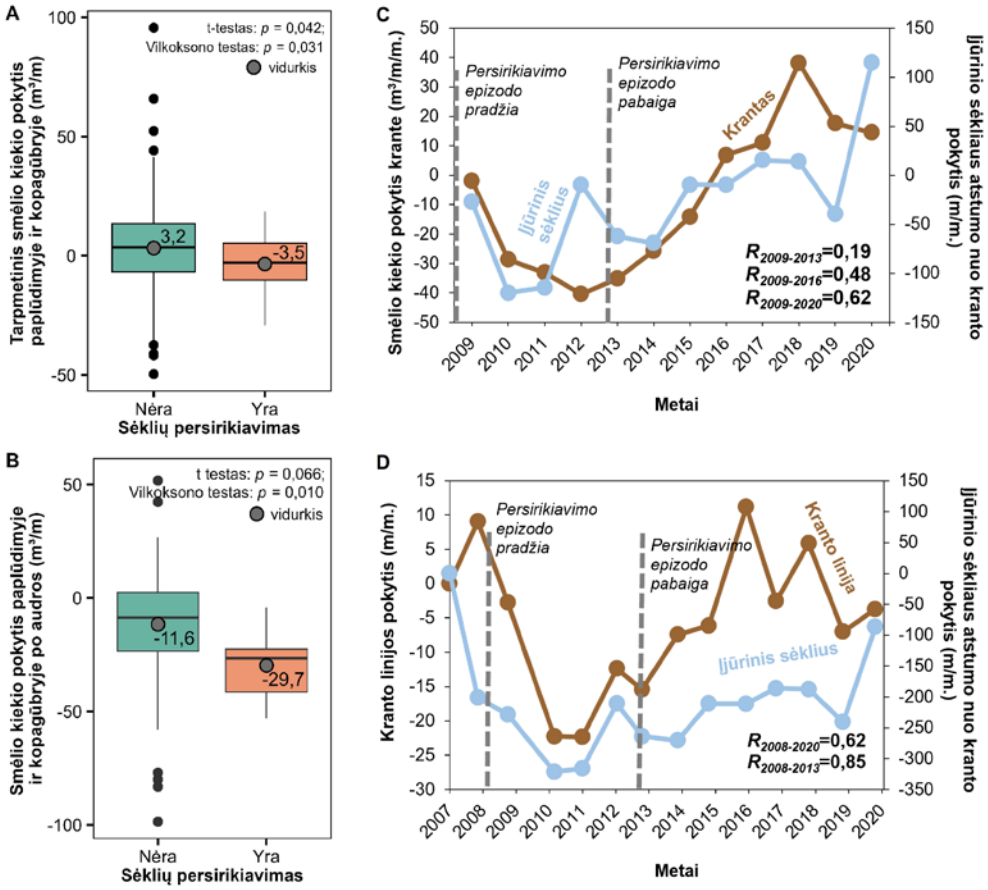
ir kt., 2022). Įjūriniam sėkliui sunykus, kitas labiausiai nuo kranto nutolęs sėklius pradeda sparčiai didėti ir migruoti jūros link, kol galiausiai pasiekia pirmtako vietą. Nustatyta, kad Kuršių nerijos Lietuvos dalies Baltijos jūros priekrantei būdinga sėkliaus ciklo pasikartojimo rodiklio trukmė (T_r) vidutiniškai siekia 6,7 m. ir ilgėja iš šiaurės į pietus (5 pav.). Nuo Kopgalio iki šiaurinės Juodkrantės dalies T_r trukmė yra mažesnė negu vidurkis ir siekia 1,8–5,3 m., o nuo pietinės Juodkrantės dalies iki Nidos šio rodiklio trukmė viršija vidurkį ir siekia 7–13,5 m. (5 pav.).

Priekrantės sėklių persirikiavimo zonų vertinimo rezultatai. Šis vertinimas pagrįstas palydoviniuose vaizduose nustatytu rodikliu – priekrantės sėklių morfologine forma ir jos pokyčiais. Remiantis šia informacija, 2009–2021 m. Kuršių nerijos Lietuvos dalies Baltijos jūros priekrantėje buvo užfiksuoti 27 priekrantės sėklių persirikiavimo epizodai (6 pav.). Vidutinė persirikiavimo epizodo trukmė siekė 14 mėn., trumpiausias epizodas truko du, o ilgiausias 49 mėn. Persirikiavimo epizodai fiksuoti tik priekrantės atkarpoje nuo Alksnynės iki Nidos, o nuo Kopgalio iki Alksnynės šis morfodinaminis reiškinys nebuvo stebimas (6 d pav.). Didžiausias priekrantės sėklių persirikiavimo epizodų skaičius užfiksuotas ties Preila ir pietine Nidos dalimi (po 7 epizodus) (6 d pav.). Nustatyta, kad Kuršių nerijai būdingi trys morfologiniai priekrantės sėklių persirikiavimo tipai, kurie skiriasi savo eiga ir pastovumu: 1) išliekantis persirikiavimas (12 atvejų) (6 a pav.); 2) laikinas persirikiavimas (11 atvejų) (6 b pav.); 3) laikinas prisišliejimas (4 atvejai) (6 c pav.) (Janušaitė ir kt., 2023).

Priekrantės sėklių ir kranto kaitos ryšio vertinimo rezultatai. Persirikiavimo epizodo metu įvyksta ženklūs priekrantės sėklių morfologinės struktūros pokyčiai, kurie ne vienus metus turi įtakos priekrantės dinamikai (Wijnberg ir kt., 2007). Tokie ženklūs ir netrumpalaikiai pasikeitimai negali būti atsiejami nuo priekrantės ir kranto sistemos morfolitohidrodinaminių procesų, todėl kyla klausimas, kaip pokyčiai sėklių zonoje veikia procesus krante. Šį ryšį atskleidžia kranto linijos padėties ir smėlio kiekio pokyčių krante ties priekrantės sėklių persirikiavimo zonomis vertinimo rezultatai. Šis vertinimas pagrįstas palydoviniuose vaizduose nustatyta kranto linijos ir įjūrinio sėkliaus viršūnės padėčių laiko eilutėmis bei priekrantės sėklių morfologine forma ir jos pokyčiais.

Įvertinus kranto linijos pokyčius persirikiavimo epizodų metu, ties 25 (iš 27) persirikiavimo zonų nustatytas kranto linijos atsitraukimas (iki 49 m, o vidutiniškai 14 m) (Janušaitė ir kt., 2023). 15 persirikiavimo zonų (visos zonos ribose) buvo stebima kranto erozija, o 10-yje kaitaliojosi kranto erozijos ir akumuliacijos arealai. Įvertinus tarpmetinius smėlio kiekio pokyčius krante (paplūdimyje ir kopagūbryje) persirikiavimo zonose ir už jų ribų, ties persirikiavimo zonomis buvo stebima vidutiniškai neženkli arda, o už jų ribų – neženkli akumuliacija (7 a pav.). Palyginus smėlio kiekio pokyčius persirikiavimo zonose ir už jų ribų audrų metu, nustatyta, kad ties jomis buvo stebima vidutiniškai didesnė arda negu už jų ribų (7 b pav.). Remiantis Vilkoksono testo rezultatais, tarp šio rodiklio medianų ties persirikiavimo zonomis ir už jų ribų tiek tarpmetinių, tiek audrų nulemtų smėlio kiekio pokyčių atveju egzistavo statistiškai reikšmingas skirtumas ($p < 0,05$) (7 a, b pav.). Šie rezultatai rodo, jog krantas ties priekrantės sėklių persirikiavimo zonomis Kuršių nerijoje yra linkęs atsitraukti.

Detaliau šio ryšio ypatumus atskleidžia persirikiavimo epizodo ties Preilos gelbėjimo stotimi 2008–2012 m. atvejo analizė. Pagal daugiametę kranto pokyčių stebėseną ties šia kranto atkarpa iki persirikiavimo epizodo krante vyravo dinaminė pusiausvyra. 2008 m. priekrantės sėkliams persirikiavus, priekrantėje buvo stebimas lokalus sėklių zonos susiaurėjimas, o krante prasidėjo erozija, siekusi 30–40 $m^3/m/m$. (7 c pav.). Pastaroji tęsėsi iki 2012 m., o po to, priekrantėje atsinaujinus įprastai sėklių struktūrai, krante įsivyravo akumuliacija, siekusi apie 20 $m^3/m/m$. (7 c pav.). Apie 2021-uosius procesai krante nusistovėjo ir jis grįžo į dinaminės pusiausvyros



7 pav. A, B – tarpmetinių (A) ir audrų nulemtų (B) smėlio kiekio pokyčių krante ties priekrantės sėklių persirikiavimo zonomis ir už jų ribų palyginimas; C, D – įjūrinio sėkliaus padėties ir smėlio kiekio pokyčių krante (C) bei įjūrinio sėkliaus padėties ir kranto linijos pokyčių (D) ties Preilos gelbėjimo stotimi ryšys prieš priekrantės sėklių persirikiavimo epizodą, jo metu ir po šio epizodo (pagal Janušaitė ir kt., 2023)

Fig 7. A, B – comparison of interannual (A) and storm-induced (B) beach-foredune sand volume change inside and outside sandbar switching zones; C, D – relationship between the change in the outer sandbar distance from shoreline and beach-foredune sand volume (C) and between the change in the outer sandbar distance from shoreline and shoreline position (D) at Preila rescue station before, during, and after the sandbar switching episode (based on Janušaitė et al., 2023)

būseną. Šiuo laikotarpiu tarp įjūrinio sėkliaus atstumo nuo kranto ir smėlio kiekio krante pokyčių bei kranto linijos pokyčių egzistavo stiprus ir vidutinio stiprumo statistiškai reikšmingas koreliacinis ryšys (7 c, d pav.).

Tokia priekrantės sėklių persirikiavimo įtaka pokyčiams krante gali būti nulemta dviejų priežasčių: 1) pasikeitusi priekrantės sėklių morfologinė struktūra sutrikdo nusistovėjusius nešmenų pernašos srautus tarp kranto ir priekrantės; 2) persirikiavimo nulemta sėklių morfologinė struktūra dažnai lemia lokalų sėklių zonos susiaurėjimą. Priekrantės sėkliai atlieka gamtinio bangolaužio vaidmenį, išsklaidydami dalį bangų energijos ir taip apsaugodami krantą (Plant ir kt., 2001; Dubarbier ir kt., 2015). Kai priekrantės sėkliai išnyksta ar jų zona susiaurėja, – sumažėja ir sėklių išsklaidomos bangų energijos kiekis, todėl didesnė bangų energijos dalis pasiekia krantą ir prisideda prie jo ardos.

DISKUSIJA

Priekrantės sėklių kaitą Kuršių nerijoje lemiantys veiksniai. Atlikto tyrimo rezultatai rodo, kad priekrantės sėkliams išilgai Kuršių nerijos jūros priekrantės būdinga netolygi raida. Sėkliaus ciklo pasikartojimo rodiklio trukmė ilgėja, o sėklių migracijos skersai kranto greitis mažėja iš šiaurės į pietus. Priekrantės sėklių persirikiavimo epizodai taip pat fiksuojami tik priekrantės atkarpoje nuo Alksnynės iki Nidos, o jų skaičius didėja pietų kryptimi. Tai rodo reikšmingus priekrantės sėklių elgsenos skirtumus Kuršių nerijos šiaurinėje ir pietinėje dalyse.

Siekiant suprasti, kas lemia šiuos skirtumus, išilgai Kuršių nerijos jūros priekrantės atlikta sėklių migracijos rodiklių, bangų, kranto konfigūraciją bei pačius sėklius apibūdinančių parametrų koreliacinė analizė. Nustatytas stiprus koreliacinis ryšys (R = 0,73 – 0,89; p < 0,05), rodantis, kad ilgesnę sėkliaus ciklo pasikartojimo rodiklio trukmę lemia krantui įžambi bangų sklidimo kryptis, ilgesnis bangų periodas ir didesnis jų aukštis, didesnis sąnašų kiekis sėkliuose, sėklių zonos gylis ir plotis (Janušaitė ir kt., 2022). Sėklių zonos gylio svarbą įjūrinės migracijos ciklo trukmei atskleidžia ir ankstesni tyrimai (Ruessink ir kt., 2003). Nustatytas vidutinio stiprumo koreliacinis ryšys (R = 0,53 – 0,73; p < 0,05) rodo, kad sėklių migracijos skersai kranto greitis labiausiai priklauso nuo sėklius ir jų zonas apibūdinančių rodiklių, t. y. greitesnę sėklių migraciją skersai kranto lemia mažesnis sąnašų kiekis sėkliuose ir mažesnis jų zonų plotis ir gylis.

Koreliacinės analizės rezultatus paaiškina kranto orientacijos skirtumai Kuršių nerijoje ir jų sąveika su vyraujančiomis bangų ypatybėmis bei jos nulemti sėklių dydžio skirtumai išilgai Kuršių nerijos jūros priekrantės. Šiaurinei nerijos daliai būdinga ŠV–PR krypties kranto konfigūracija ir vyraujančios V–PV krypties bangos lemia, kad jos dažniau į krantą ritasi statmenai. Tada fiksuojamas didžiausias sėklių migracijos skersai kranto greitis (Dubarbier ir kt., 2015), o tai lemia spartesnę jų migraciją ir stipresnę skersinę nešmenų pernašą, dėl kurios ir neženkliai mažesnių bangų šiaurinėje nerijos dalyje susidaro mažesni sėkliai. Jiems išjudinti užtenka mažesnės bangų energijos, todėl jie daug sparčiau migruoja.

Pietinei nerijos daliai būdinga ŠR–PV krypties kranto konfigūracija ir vyraujančios V–PV krypties bangos lemia tai, kad jos dažniau į krantą ritasi įžambiai. Todėl čia sėklių migracija lėtesnė ir palankesnės sąlygos susidaryti išilginėms srovėms, kurių stipresnė veikla ir neženkliai aukštesnės bangos pietinėje nerijos dalyje sudaro palankesnes sąlygas didesniems sėkliams susiformuoti, o tai prisideda prie lėtesnės jų migracijos skersai kranto.

Iš dalies tai patvirtina ir priekrantės sėklių persirikiavimo zonų susidarymo vietos, būdingiausios pietinei Kuršių nerijos daliai (6 b pav.). Ankstesni tyrimai rodo, kad priekrantės sėklių persirikiavimas vyksta veikiant įžambioms bangoms ir stiprioms išilginėms srovėms (Shand ir kt., 2001; Aleman ir kt., 2017), kurios dažnesnės pietinėje Kuršių nerijos dalyje. Nustatytas ir naujas veiksnys – dažnausiai persirikiavimo vietos susidaro ties skirtingos kranto linijos orientacijos lūžio taškais (Janušaitė ir kt., 2023). Esminė sąlyga priekrantės sėklių persirikiavimui susidaryti yra netolygi sėkliaus kaita išilgai priekrantės (Shand ir kt., 2001; Walstra ir kt., 2016), o prie procesų išilgai priekrantės netolygumo prisideda ir įžambi bangų energija bei netolygi kranto konfigūracija.

Tiek sėklių migracijos skersai kranto skirtumus, tiek šių formų persirikiavimo vietų susidarymą lemiančių veiksnių analizė rodo, kad priekrantės sėklių raidos skirtumai yra nulemti nedidelių hidrodinaminių skirtumų išilgai Kuršių nerijos jūros priekrantės ir jų sąveikos su kranto konfigūracija.

Palydovinių vaizdų priekrantės sėklių tyrimams teikiama nauda ir apribojimai. Anksčiau Baltijos jūros Lietuvos dalies priekrantėje nuoseklūs sėklių tyrimai nevykdyti, todėl daugiamečių duomenų apie jų struktūrą nesukaupta, o tai gerokai riboja galimybes visapusiškai pažinti kranto zonos procesus. Palydoviniuose vaizduose

nustatytos sėklių morfologinės charakteristikos ir parengta jų analizės metodika leidžia visame Baltijos jūros Lietuvos krante atlikti šių smėlio formų tyrimus. Tokios apimties priekrantės sėklių tyrimai anksčiau Lietuvoje nebuvo atliekami, todėl jie labai svarbūs ne tik fundamentaliam kranto zonos pažinimui, bet ir praktinio pobūdžio tyrimams, numatant galimus kranto kaitos scenarijus ir atitinkamas krantotvarkos priemones.

Plačios erdvinės aprėpties palydovinių vaizdų informacija pagrįsti duomenys sėklių tyrimams suteikia kitas galimybes. Jie leidžia pažinti sėklių dinamikos skirtumus išilgai kranto ilguose nepertraukiamuose ruožuose, siekiančiuose dešimtis ar net šimtus kilometrų (Tătui, Constantin, 2020; Janušaitė ir kt., 2022). Tradiciniai sėklių tyrimo metodai tai ribojo dėl technologinių ypatumų ir didelių kaštų. Šiame darbe pasiūlytas priekrantės sėklių identifikavimo ir analizės palydoviniuose vaizduose algoritmas, pagal vietos sąlygas modifikavus dalį įvesties parametrų, galėtų būti taikomas ir kitose smėlėtose priekrantėse, kuriose aptinkami šie smėlio gūbriai, o duomenų kiekis apie juos ribotas. Šiam tikslui galėtų būti pritaikyti ir kitų autorių pasiūlyti mechaninio pobūdžio (Athanasiou ir kt., 2018), iš dalies automatizuoti (Román-Rivera ir kt., 2020) ar automatizuoti (Tătui, Constantin, 2020) algoritmai, tačiau pasiūlytas (automatizuotas) šiame darbe juos pranoksta didesniu gaunamų morfologinių charakteristikų skaičiumi, panašiu ar geresniu tikslumu ir universalumu.

Kuršių nerijos jūros priekrantėje atliktų tyrimų pavyzdžiai rodo, kad pasitelkus optinių palydovinių vaizdų informaciją galima atlikti priekrantės sėklių dinamikos skersai kranto analizę, gaunant analogiškas sėklių morfologines ir dinamines charakteristikas kaip ir naudojantis stebėsenos vaizdo kameromis ar remiantis batimetriniais duomenimis. Šios metodikos pagrindu nustatyta sėklių viršūnių padėties laiko eilutė gali būti pasitelkta migracijos skersai kranto pagal skirtingas laiko skales analizei, o daugiaskalio santykinės batimetrinės padėties rodiklio laiko eilutė kaip batimetrinių duomenų alternatyva – įjūrinės migracijos ciklui vertinti. Pasiūlyta metodika parengta taip, kad jos pritaikymui nereikėtų jokių papildomų vietos duomenų, net ir batimetrijos, o tai gerokai sumažina sėklių tyrimų kaštus.

Palydovinių jutiklių užfiksuotuose vaizduose nustatytos priekrantės sėklių morfologinės charakteristikos leidžia detaliai tirti jų morfodinamiką, kuri anksčiau buvo pagrįsta stebėsenos vaizdo kameromis duomenimis kelių kilometrų ilgio priekrantės ruožuose (Román-Rivera, Ellis, 2019). Ilgesnių kranto atkarpų analizė leidžia pažinti visą sėklių morfologinių formų ir morfodinaminių reiškinių įvairovę bei dėsningumus, taip pat atskleisti naujus reiškinius ir dėsningumus. Pavyzdžiui, atlikus priekrantės sėklių persirikiavimo epizodų tyrimą atskleistas ryšys tarp šio reiškinio ir kranto erozijos, kuris anksčiau mokslinėje literatūroje neaprašytas.

Nors palydovinių vaizdų pritaikymas turi daug privalumų, tam, kad priekrantės sėklių forma būtų identifikuojama ir tiksliai nustatomos jos charakteristikos, vaizdas turėtų būti užfiksuotas giedrą dieną, kai debesuotumas neviršija 20–30 %, o vandens paviršius turėtų būti pakankamai skaidrus ir be vizualiai matomų gožtančių bangų (Tătui, Constantin, 2020; Janušaitė ir kt., 2021). Nors priekrantės sėklių viršūnes galima nustatyti ir pagal bangų gožos padėtį, bandymų rezultatai rodo, jog tokiu atveju identifikuotų viršūnių padėties tikslumas sumažėja 2–3 kartus (Janušaitė ir kt., 2021). Todėl analizei tinkamų palydovinių vaizdų dažnis priklauso nuo tyrimo teritorijos klimatinių sąlygų. Didžioji dalis analizei tinkamų vaizdų Lietuvoje užfiksuojama kovo–spalio mėn., o šaltojo sezono mėnesiai lieka kur kas mažiau reprezentuoti.

IŠVADOS

Šiame darbe pasiūlyta metodika, leidžianti automatizuotą priekrantės sėklių identifikavimą keturių didelės ir vidutinės erdvinės skiriamosios gebos palydovinių jutiklių vaizduose dideliu tikslumu. Šiuo būdu

nustatytos sėklių charakteristikos leidžia atlikti jų migracijos ir morfodinamikos tyrimus, taikant tradicinius sėklių morfologinių rodiklių analizės metodus be papildomų tiesioginių matavimų. Kuršių nerijos Baltijos jūros priekrantėje atliktas sėklių migracijos statmenai kranto pagal skirtingas laiko skales ir jos cikliškumo vertinimas, taip pat sėkliams būdingo persirikiavimo reiškinio lokalizavimas ir analizė. Šie vertinimai atskleidė priekrantės sėklių raidos skirtumus išilgai Kuršių nerijos jūros priekrantės ir sudarė prielaidas nustatyti jų priežastis. Gauti rezultatai rodo, jog priekrantės sėkliai šiaurinėje Kuršių nerijos dalyje keičiasi sparčiau negu pietinėje, o jų persirikiavimas linkęs susidaryti tik į pietus nuo Alksnynės. Tai siejama su neženkliais vyraujančių hidrodinaminių procesų skirtumais Kuršių nerijos jūros priekrantėje ir jų sąveika su vyraujančia kranto konfigūracija.

Didelė palydovinės informacijos erdvinė aprėptis, beveik kasdienis vaizdų fiksavimo dažnis ir galimybė tirti sėklių elgsenos ypatumus vietovėse, kuriose dėl duomenų stokos sėkliai iki šiol nebuvo tirti, leidžia detaliau pažiūrėti į priekrantės morfologinius pokyčius ir jų ryšį su pokyčiais krante. Tai sudaro prielaidas pastebėti iki šiol nežinotus dėsningumus, kaip kad Kuršių nerijos jūros krante pirmą kartą užfiksuotas ryšys tarp priekrantės sėklių persirikiavimo ir kranto ardos, galintis ženkliai prisidėti prie kranto erozijos prognozavimo.

Pristatyti Kuršių nerijos jūros priekrantės sėklių dinamikos tyrimų pavyzdžiai atskleidžia tik dalį palydovinių vaizdų panaudojimo šių formų tyrimams galimybių, kurios, sukūrus ir pritaikius į sėklių specifiką orientuotas metodikas, yra itin plačios. Iki šiol palydoviniai vaizdai priekrantės sėklių tyrimuose buvo naudojami vangiai, todėl jų teikiami privalumai krantų geomorfologijoje kol kas menkai išnaudoti. Pastaraisiais metais pradėti kurti tam skirti metodai gali prisidėti prie tokio pobūdžio tyrimų pagausėjimo ir naujų įžvalgų apie priekrantės sėklių elgseną atsiradimo, o tai galėtų paskatinti domėjimąsi šiomis povandeninėmis reljefo formomis ir jų įtaka kranto raidai.

Literatūra

Aagaard, T., Davidson-Arnott, R., Greenwood, B., Nielsen, J. Sediment supply from shoreface to dunes: linking sediment transport measurements and long-term morphological evolution. *Geomorphology*, 2004, vol. 60 (1–2), p. 205–224.

Acharya, T., Subedi, A., Lee, D. Evaluation of water indices for surface water extraction in a Landsat 8 scene of Nepal. *Sensors*, 2018, vol. 18 (8), p. 2 580.

Aleman, N., Certain, R., Robin, N., Barusseau, J. P. Morphodynamics of slightly oblique nearshore bars and their relationship with the cycle of net offshore migration. *Marine Geology*, 2017, vol. 392, p. 41–52.

Athanasiou, P., de Boer, W., Yoo, J., Ranasinghe, R., Reniers, A. Analysing decadal-scale crescentic bar dynamics using satellite imagery: a case study at Anmok beach, South Korea. *Marine Geology*, 2018, vol. 405, p. 1–11.

Castelle, B., Masselink, G., Scott, T., Stokes, C., Konstantinou, A., Marieu, V., Bujan, S. Satellite-derived shoreline detection at a high-energy meso-macrotidal beach. *Geomorphology*, 2021, vol. 383 (1–4), p. 107707.

Cohn, N., Ruggiero, P., De Vries, S., García-Medina, G. Beach growth driven by intertidal sandbar welding. *Coastal Dynamics*, 2017, p. 12–16.

Do, J. D., Jin, J. Y., Jeong, W. M., Lee, B., Kim, C. H., Chang, Y. S. Observation of nearshore crescentic sandbar formation during storm wave conditions using satellite images and video monitoring data. *Marine Geology*, 2021, vol. 442, p. 106 661.

Dubarbier, B., Castelle, B., Marieu, V., Ruessink, G. Process-based modeling of cross-shore sandbar behavior. *Coastal Engineering*, 2015, vol. 95, p. 35–50.

Gao, J. Bathymetric mapping by means of remote sensing: methods, accuracy and limitations. *Progress in Physical Geography*, 2009, vol. 33 (1), p. 103–116.

Gijsman, R., Ruessink, B. G., Visscher, J., Schlurmann, T. Observations on decadal sandbar behaviour along a large-scale curved shoreline. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2021, vol. 46 (2), p. 490–503.

Grossmann, F., Hurther, D., Zanden, J. van der, Sánchez-Arcilla, A., Alsina, J. M. Near-bed sediment transport processes during onshore bar migration in large-scale experiments: comparison with offshore bar migration. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2023, vol. 128 (3), p. e2022JC018998.

Holman, R. A., Stanley, J. The history and technical capabilities of Argus. *Coastal Engineering*, 2007, vol. 54 (6–7), p. 477–491.

Houborg, R., McCabe, M. F. A Cubesat enabled Spatio-Temporal Enhancement Method (CESTEM) utilizing Planet, Landsat and MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 2018, vol. 209, p. 211–226.

Janušaitė, R., Jukna, L., Jarmalavičius, D., Pupienis, D., Žilinskas, G. A Novel GIS-based approach for automated detection of nearshore sandbar morphological characteristics in optical satellite imagery. *Remote Sensing*, 2021, vol. 13 (11), p. 2 233.

Janušaitė, R., Jarmalavičius, D., Jukna, L., Žilinskas, G., Pupienis, D. Analysis of interannual and seasonal nearshore bar behaviour observed from decadal optical satellite data in the Curonian Spit, Baltic Sea. *Remote Sensing*, 2022, vol. 14 (14), p. 3 423.

Janušaitė, R., Jarmalavičius, D., Pupienis, D., Žilinskas, G., Jukna, L. Nearshore sandbar switching episodes and their relationship with coastal erosion at the Curonian Spit, Baltic Sea. *Oceanologia*, 2023, vol. 65 (1), p. 71–85.

Lippmann, T. C., Holman, R. A. The spatial and temporal variability of sand bar morphology. *Journal of Geophysical Research*, 1990, vol. 95 (C7), p. 575–586.

Melito, L., Parlagreco, L., Perugini, E., Postacchini, M., Devoti, S., Soldini, L., Zitti, G., Liberti, L., Brocchini, M. Sandbar dynamics in microtidal environments: migration patterns in unprotected and bounded beaches. *Coastal Engineering*, 2020, vol. 161, p. 103 768.

Plant, N. G., Freilich, M. H., Holman, R. A. Role of morphologic feedback in surf zone sandbar response. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2001, vol. 106 (C1), p. 973–989.

Price, T. D., Ruessink, B. G. State dynamics of a double sandbar system. *Continental Shelf Research*, 2011, vol. 31 (6), p. 659–674.

Price, T. D., Ruessink, B. G., Castelle, B. Morphological coupling in multiple sandbar systems – a review. *Earth Surface Dynamics*, 2014, vol. 2 (1), p. 309–321.

Price, T., Dionísio António, S., Van Kuik, N., De Wit, L., Ruessink, G. Alongshore variability of nearshore morphology during net offshore bar migration. *AGUFM*, 2016, vol. 2 016, p. EP14A-02.

Robin, N., Certain, R., Bouchette, F., Anthony, E. J., Meulé, S., Aleman, N. Wave-driven circulation over a double nearshore bar system during storm conditions. *Journal of Coastal Research*, 2014, vol. 70, p. 84–89.

Román-Rivera, M. A., Ellis, J. T. A synthetic review of remote sensing applications to detect nearshore bars. *Marine Geology*, 2019, vol. 408, p. 144–153.

Román-Rivera, M. A., Ellis, J. T., Wang, C. Applying a rule-based object-based image analysis approach for nearshore bar identification and characterization. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2020, vol. 14 (04), p. 044 502.

Ruessink, B. G., Kroon, A. The behaviour of a multiple bar system in the nearshore zone of Terschelling, the Netherlands: 1965–1993. *Marine Geology*, 1994, vol. 121 (3–4), p. 187–197.

Ruessink, B. G., Wijnberg, K. M., Holman, R. A., Kuriyama, Y., van Enckevort, I. M. J. Intersite comparison of interannual nearshore bar behavior. *Journal of Geophysical Research C: Oceans*, 2003, vol. 108 (8), p. 5–1.

Rutten, J., Ruessink, B. G., Price, T. D. Observations on sandbar behaviour along a man-made curved coast. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2018, vol. 43 (1), p. 134–149.

Shand, R. D., Bailey, D. G., Shepherd, M. J. Longshore realignment of shore-parallel sand-bars at Wanganui, New Zealand. *Marine Geology*, 2001, vol. 179 (3–4), p. 147–161.

Shepard, F. P. Longshore-bars and longshore-troughs. *Beach Erosion Board Technical Memorandum*, 1950, vol. 15, p. 1–31.

Splinter, K. D., Gonzalez, M. V. G., Oltman-Shay, J., Rutten, J., Holman, R. Observations and modelling of shoreline and multiple sandbar behaviour on a high-energy meso-tidal beach. *Continental Shelf Research*, 2018, vol. 159, p. 33–45.

Tătui, F., Vespremeanu-Stroe, A., Preoteasa, L. The correlated behavior of sandbars and foredunes on a nontidal coast (Danube Delta, Romania). *Journal of Coastal Research*, 2013, vol. 165, p. 1 874–1 879.
Tătui, F., Constantin, S. Nearshore sandbars crest position dynamics analysed based on Earth Observation data. *Remote Sensing of Environment*, 2020, vol. 237, p. 111 555.
Teodoro, A. C. Optical satellite remote sensing of the coastal zone environment – an overview. *Environmental Applications of Remote Sensing*. InTech, 2016.
Van Enckevort, I. M. J., Ruessink, B. G. Video observations of nearshore bar behaviour. Part 1: Alongshore uniform variability. *Continental Shelf Research*, 2003 a, vol. 23 (5), p. 501–512.
Van Enckevort, I. M. J., Ruessink, B. G. Video observations of nearshore bar behaviour. Part 2: Alongshore non-uniform variability. *Continental Shelf Research*, 2003 b, vol. 23 (5), p. 513–532.
Vos, K., Harley, M. D., Splinter, K. D., Simmons, J. A., Turner, I. L. Sub-annual to multi-decadal shoreline variability from publicly available satellite imagery. *Coastal Engineering*, 2019, vol. 150, p. 160–174.
Vos, K., Harley, M. D., Turner, I. L., Splinter, K. D. Pacific shoreline erosion and accretion patterns controlled by El Niño / Southern Oscillation. *Nature Geoscience*, 2023, vol. 16 (2), p. 140–146.
Walstra, D. J., Wesselman, D., van der Deijl, E., Ruessink, G. On the intersite variability in inter-annual nearshore sandbar cycles. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2016, vol. 4 (1), p. 15.
Wijnberg, K. M., Wolf, F. C. J. Three-dimensional behaviour of a multiple bar system. *Proceedings of Coastal Dynamics – 94*. ASCE, 1994, p. 59–73.
Wijnberg, K. M., Kroon, A. Barred beaches. *Geomorphology*, 2002, vol. 48 (1–3), p. 103–120.
Wijnberg, K. M., Aarninkhof, S. G. J., Spanhoff, R. Response of a shoreline sand wave to beach nourishment. *Coastal Engineering – 2006*. World Scientific Publishing Company, 2007, p. 4 205–4 217.
Wright, L. D., Short, A. D. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis. *Marine Geology*, 1984, vol. 56, p. 93–118.

SUMMARY

THE USE OF SATELLITE IMAGERY IN THE STUDY OF CURONIAN SPIT NEARSHORE SANDBARS: METHODOLOGICAL ASPECTS AND EXAMPLES OF APPLICATION

Nearshore sandbars are important features of sandy coasts, playing a crucial role in sediment exchange between the beach and the nearshore, but the scarcity of data hampers nearshore sandbar studies. The increasing availability of satellite imagery offers a cost-effective solution to studying these underwater ridges, yet methodologies for such applications are still evolving.

This study aims to develop a methodology for the identification and analysis of nearshore sandbars in optical satellite imagery and to demonstrate its capabilities with a multiple sandbar system in the Lithuanian part of the Curonian Spit. An automated multi-step GIS-based algorithm is proposed for the extraction of multiple sandbar morphologies from images of four satellite sensors. These features include shoreline positions, the multi-scale relative bathymetric position index, sandbar boundaries, and crests. Using the proposed method, sandbar crests are derived from satellite images with good accuracy compared to bathymetry-derived crests.

Satellite-derived features are employed to assess nearshore sandbar cross-shore migration on different time scales, investigate their cyclic offshore-directed behaviour, and examine the longshore realignment of sandbars, along with its relation to changes in the subaerial beach. The analysis of sandbar dynamics reveals significant alongshore variability in nearshore sandbar behaviour within the Curonian Spit. It shows that sandbars in the southern part of the Curonian Spit exhibit lower cross-shore migration rates, longer bar cycle return periods, and a higher number of sandbars switching episodes compared to the northern part. These variations are attributed to small alongshore differences in nearshore hydrodynamics and their interaction with shoreline configuration. In addition, a connection between sandbar switching episodes and beach erosion is first observed.

Study results demonstrate the feasibility of optical satellite remote sensing for studying nearshore sandbar behaviour and revealing previously unobserved sandbar-related phenomena.