



## POVANDENINIO TRIUKŠMO PASISKIRSTYMO MODELIAVIMAS LIETUVOS BALTIJOS JŪROS TERITORIJOJE

Donatas BAGOČIUS<sup>1</sup>, Aleksas NARŠČIUS<sup>2</sup>

*Klaipėdos universitetas, Klaipėda, Lietuva*

*El. paštas: <sup>1</sup>donatas.bagocius@jmtc.ku.lt; <sup>2</sup>aleksas@apc.ku.lt*

**Santrauka.** Jūros gyvūnų buveinės, esančios jūrinėje aplinkoje, gali būti apibūdintos pagal joms būdingą garsovaizdį. Jūros gyvūnai povandeninius garsus naudoja siekdami orientuotis aplinkoje, poruotis, bendrauti bei justis (Hildebrand 2009). Antropogeninės žmogaus veiklos nuolat spinduliuoja povandeninį triukšmą į šią aplinką. Šios veiklos apima: komercinę laivybą, seisminius dugno tyrimus, gamtinių išteklių žvalgybą, karinę žvalgybą bei minų medžioklę, žuvininkystę, rekreaciją bei uostų plėtrą. Žemo dažnio juostose triukšmingiausios antropogeninės veiklos yra komercinė laivyba bei seisminiai jūros dugno tyrimai (MMC 2007). Europos Sąjungos Jūrų strategijos pagrindų direktyvos ir Lietuvos Respublikos jūros aplinkos apsaugos įstatymo nuostatos apibrėžia povandeninį triukšmą kaip neigiamą fizinį trikdymą bei neigiamą poveikį jūros aplinkai. Europos Komisijos sprendimo ES/2010/477 nuostatose numatyta, jog nuolatinio triukšmo jūroje vertinimas gali būti atliktas stebint triukšmo kitimo tendencijas stebėjimo stotyse ir (arba) remiantis matematiniais modeliais. Yra žinoma, kad vienas iš pagrindinių ir svarbiausių triukšmo šaltinių LR Baltijos jūros teritorijoje yra komercinė laivyba. Klaipėdos universitete, pradėjus povandeninio triukšmo tyrimus, atsirado poreikis kartografuoti povandeninio triukšmo, kurį sukelia jūroje esantys laivai, pasiskirstymą. Šiame straipsnyje pristatomi metodai, kurie buvo taikyti eksperimentiniam povandeninio triukšmo modeliui sukurti, bei pirmieji rezultatai, apskaičiuoti panaudojus 2015 m. automatinės identifikavimo sistemos duomenis.

**Reikšminiai žodžiai:** Baltijos jūra, laivyba, fizinė tarša, povandeninis triukšmas, modeliavimas.

### Įvadas

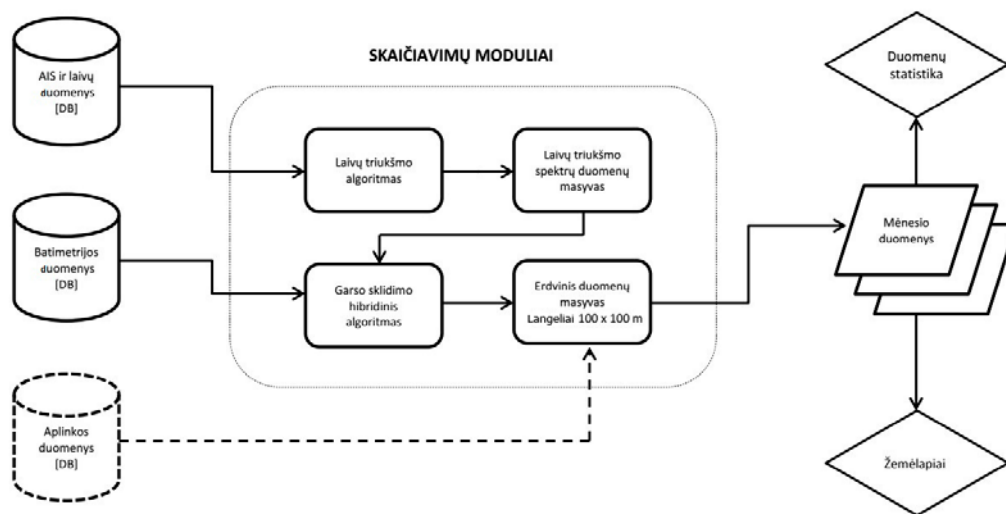
Povandeninio triukšmo kartografavimas (modeliavimas) gali būti atliktas, jei yra: 1) apskaičiuojami duomenys apie laivų tankį tam tikroje teritorijoje, 2) žinomi atskirų laivų generuojamo triukšmo lygiai bei 3) žinomi garso sklaidimo nuostoliai, kurie yra aktualūs atkarpoje tarp atskirų laivų bei matavimų stočių, įskaitant jų numanomus gylius (Urlick 1983). Šiuo metu yra žinoma nemažai sudėtingų fizikinių povandeninio triukšmo modelių (Jensen *et al.* 2011; Carey, Evans 2011; Etter 2012), tačiau supaprastintų priemonių, skirtų povandeniniam triukšmui modeliuoti bei aplinkos būklei vertinti, vis dar yra nedaug (Erbe *et al.* 2012). Šiuo tikslu Klaipėdos universitete buvo pradėtas kurti supaprastintas povandeninio triukšmo modelis, kurį taikant galima prognozuoti laivų sukeliama triukšmo lygius erdvėje, pasitelkiant jau turimą kitų šalių patirtį (Erbe *et al.* 2014; Gervaise *et al.* 2015; Simard *et al.* 2016). Šio modelio programavimas buvo suskirstytas į 3 etapus: 1) programinio modulio, skirto automatinės identifikavimo sistemos (AIS) laivų registravimo duomenims apdoroti bei laivų triukšmo lygiams (GSL) tiriamoje vietovėje apskaičiuoti, sukūrimas; 2) modulio, skirto triukšmo lygių vidurkiams apskaičiuoti

duomenų tinklelyje (100×100 m), įskaitant sklindantį ir kaimyninius langelius triukšmą bei kai kurių aplinkos veiksnių – vėjo ir lietaus – triukšmo indelį, sukūrimas bei 3) papildomo modulio sukūrimas, kuris leistų apskaičiuoti triukšmo statistinius duomenis (sukaupytųjų dažnių laužtes, tankio funkcijas, histogramas ir procentiles) norimose vietovėse bei atvaizduoti rezultatus žemėlapiuose naudojant duomenų tinklę. Šio tyrimo tikslas yra apibendrinti bei aptarti metodus, kurie buvo taikyti kuriant modelį, pristatyti sukurto modelio veikimo principą bei pirmuosius eksperimentinius rezultatus, kurie buvo gauti panaudojus AIS 2015 m. duomenis.

### Metodika

#### 1. Modelio veikimo schema

Povandeninio triukšmo modeliavimas buvo atliktas MATLAB® kompiuterinės programos aplinkoje. Triukšmo lygiams skaičiuoti buvo sukurti trys atskiri moduliai, kurie atliko tokius modeliavimo žingsnius: 1) skaičiavo triukšmo lygius kiekvienoje laivų pozicijoje; 2) skaičiavo nuo žiemos–vasaros sezono, jūros gylio bei garso bangos ilgio



1 pav. Modelio veikimo principinė schema (punkturais pažymėtas planuojamas atlikti programavimas)

Fig. 1. Principal diagram of the model developed (dotted chart marks planned modelling part)

priklausomą triukšmo sklaidimą, įtraukiant mažo gylio atkirtimo dažnio bei žemo dažnio korekcijas; 3) apskaičiavo triukšmo lygių vidurkius bei statistinius duomenis langeliuose bei erdvinį duomenų tinklą toliau apdoroti (kartografuoti).

Loginė veiksmų seka, kurią sudaro duomenų surinkimas iš duomenų bazių, jų apdorojimas, matematinių skaičiavimų atlikimas bei tolesnis apdorojimas (angl. *post processing*), atvaizduota modelio veikimo principinėje schemoje (1 pav.).

## 2. Laivų triukšmo lygių skaičiavimas

Automatinės identifikavimo sistemos duomenims apdoroti buvo parašyti du atskiri moduliai, kurie turimus laivų duomenis sugrupavo bei susistemino.

Išanalizavus prieinamus matematinius algoritmus, kuriuos pritaikius galima apskaičiuoti laivų generuojamus triukšmo lygius (Scrimger, Heitmeyer 1988; Urick 1983; Wittekind 2014), bei atsižvelgiant į laivų duomenų prieinamumą interneto duomenų bazėse, buvo atrinktas tinkamiausias, Breeding ir kt. (1996) autorių sukurtas algoritmas, kuris apskaičiuoja laivų triukšmo lygius, išreiškia juos laivų ilgių bei jų greičių funkcijomis. Modelis buvo užprogramuotas apskaičiuoti laivų triukšmo lygius (GSL) kiekvienoje AIS sistemos fiksuotoje erdvinėje koordinatėje. Šis algoritmas aprašytas toliau:

$$Ls = Lso(f) + 60Lg\left(\frac{v}{12}\right) + 20Lg\left(\frac{ls}{300}\right) + df \times dl + 3,0, \quad (1)$$

čia  $Ls$  – individualių laivų triukšmo lygis,  $v$  – laivo greitis mazgais,  $ls$  – laivo ilgis pėdomis,  $Lso(f)$  =

kai  $f < 500$  Hz:

$$Lso(f) = -10Lg\left(10^{-1,06Lgf-14,34} + 10^{3,32Lgf-21,425}\right);$$

kai  $f > 500$  Hz:

$$Lso(f) = 173,2 - 18,0Log(f)$$

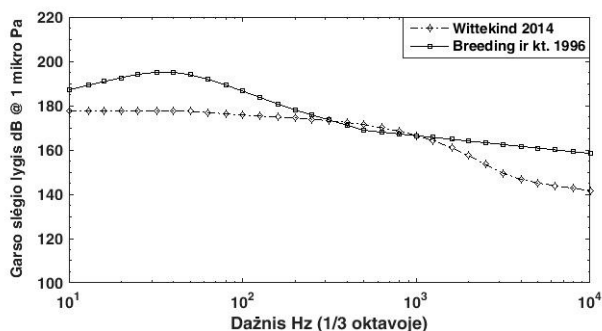
$$df = \begin{cases} 0,0 \leq f \leq 28,4, & df = 8,1 \\ 28,4 < f \leq 191,6, & df = 22,3 - 9,77Lg(f) \end{cases}$$

$$dl = ls^{1,15} / 3643,0.$$

Prie apskaičiuotų povandeninio triukšmo lygių pridama žemo dažnio korekcija (didžiausioji vertė):

$$LF_{cor}(f) = \max\left[0; 10Lg\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{\left(\frac{4\pi f}{c} z \sin(\theta)\right)^2}\right)\right], \quad (2)$$

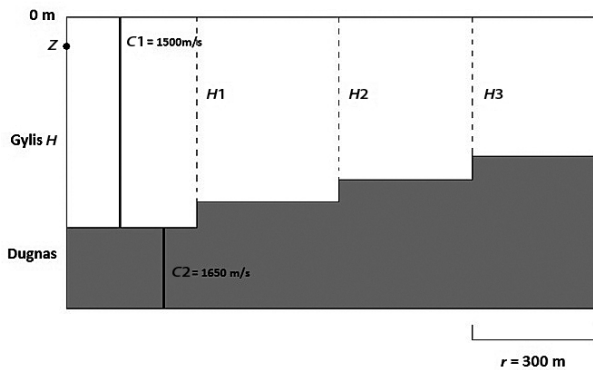
čia  $f$  – dažnis,  $z$  – triukšmo šaltinio gylis,  $\theta$  – kampas tarp hipotetinės matavimų stoties ir horizontalės, statmenos triukšmo šaltiniui (Ainslie 2010). Taikomas algoritmas buvo palygintas su algoritmu, sukurtu Vokietijoje autorių Wittekind ir kt. (2014). Algoritmų palyginimas pateiktas 2 pav.



2 pav. Taikyto triukšmo šaltinių algoritmo spektrinių charakteristikų palyginimas su Wittekind (2014) algoritmu (triukšmo šaltinis ro-ro laivas 25,993 GT, 20,4 mazgų greitis)  
Fig. 2. Comparison of the noise spectra of algorithm used with the algorithm by Wittekind (2014) (noise source Ro-Ro vessel 25 993 Gross tonnage, operating at 20.4 knots)

### 3. Garso sklidimo skaičiavimas

Dėl sąlygiškai seklaus LR Baltijos jūros dalies gylio (Baltijos jūros vidutinis gylis ~54 metrai (Leppāranta, Myrberg 2009; Seifert *et al.* 2001) garso sklidimas LR Baltijos jūros dalyje ypatingas tuo, kad tolimesniais atstumais sklindančios garso bangos yra absorbuojamos aplinkoje labiau, lyginant su giliomis jūrinėmis vietovėmis, o tam tikrais dažniais yra sutelkiamos bangonašoje bei sklinda pernešdamos didesnę energiją nei įprasta tais dažniais (Lurton 2010). Taip pat dėl rytinei Baltijos jūros pakrantei būdingų hidrofizinių savybių žiemos sezonu garso bangos sklinda pernešdamos daugiau energijos, palyginti su vasaros sezonu šiose teritorijose (Klusek, Lisimenka 2016). Garso sklidimo nuostoliams apskaičiuoti buvo suprogramuotas atskiras modulis, skaičiuojantis garso sklidimo nuostolius sekliuose vandenyse, taikant algoritmus, sukurtus Ainslie ir kt. (2014), skirtus sferiniam, modaliniam (angl. „mode stripping“) bei cilindriniam garso sklidimui. Garso sklidimo vandens storumėje schema, pagal kurią modulis apskaičiuoja garso sklidimo nuostolius, esant skirtingiems gyliams, pateikta 3 pav.



3. pav. Garso sklidimo vandens storumėje schema, esant dugno batimetrijos pokyčiams bei garso greičio skirtumams vandenyje bei dugno sedimentuose ( $z$  – triukšmo šaltinio gylis,  $H$  – vandens gylis,  $r$  – atstumas)

Fig. 3. Sound propagation computation schematics in the water column with the custom bathymetry and different sound speeds in water and sediments ( $z$  – source depth,  $H$  – water depth,  $r$  – horizontal distance)

Garso bangų sklidimo modulis buvo suprogramuotas garso sklidimui skaičiuoti dvejais etapais: I – skaičiuojant sferinį sklidimą, II – skaičiuojant modalinį arba cilindrinį sklidimą, kur lūžio taškas tarp sferinio ir modalinio (arba cilindrinio) sklidimo apskaičiuojamas pagal formulę:

$$r_l = \frac{H}{2 \tan \beta^\circ}, \quad (3)$$

čia  $r_l$  – lūžio taškas,  $H$  – vandens gylis,  $\beta^\circ$  – šlyčių kampas (efektyvus kampas) tarp garso bangos sklidimo krypties bei terpės ribų (Lurton 2010). Kampas  $\beta^\circ$  apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\beta^\circ = \arccos\left(\frac{C_1}{C_2}\right), \quad (4)$$

čia  $C_1$  – garso greitis vandenyje,  $C_2$  – garso greitis dugno sedimentuose (smėlyje) (Jensen *et al.* 2011).

Sferinis sklidimas skaičiuojamas pagal:

$$TL = 40Lg\left(\frac{r}{r_0}\right) - 10Lg\left[4\left(\frac{kzD}{r_0}\right)^2\right] \quad (5)$$

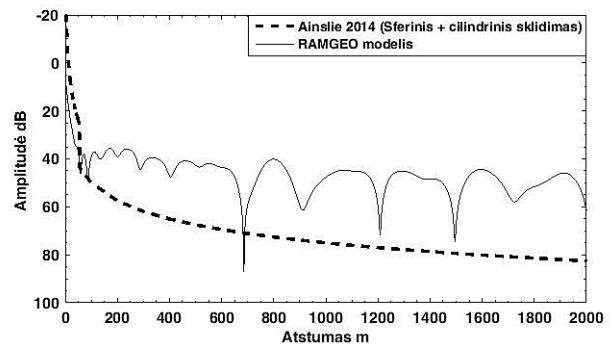
čia  $r$  – atstumas,  $r_0$  – referencinis atstumas (1 m),  $k$  – bangos numeris,  $z$  – triukšmo šaltinio gylis (6,1 m),  $D$  – priimtuvo gylis (1/2 vandens gylio).

Modalinis sklidimas skaičiuojamas pagal:

$$TL = 25Lg\left(\frac{r}{r_0}\right) + 10Lg\left[4(kz)^{-2} \left(\frac{\eta^3 r_0}{\pi H}\right)^{1/2}\right], \quad (6)$$

čia  $\eta$  – santykinė konstanta, skirta smėlio bei dumblo dugnui 0,3 Np/rad (Ainslie *et al.* 2014). Garso sklidimo rezultatai, apskaičiuoti taikant šį modelį, buvo palyginti su ypač tikslaus RAMGEO „Parabolinių skaičiavimų“ modelio skaičiavimų rezultatais, kurie pateikti 4 pav.

Garsovaizdžiui atvaizduoti erdvėje modulis buvo užprogramuotas apskaičiuoti garso sklidimą aplink kiekvieną triukšmo šaltinio koordinatę erdvėje 32-omis azimutinėmis kryptimis, esant azimutiniam kampo pokyčiui  $\Delta\theta$  kas 11,25° (360/ $\Delta\theta$ ), taikant metodą, panašų į 2D × N metodą (Jensen *et al.* 2011; Zykov *et al.* 2012). Azimutinėmis kryptimis (~37 000 metrų kiekvienai azimutinei kryptiai) kiekviename žingsnyje (kas 300 metrų) buvo atliekama loginė logaritminių skaičiavimų reikšmių suma, sudarant garso slėgio lygių reikšmių masyvą dažnių diapazone nuo 0,01–10 kHz (kiekvienos 1 Hz bangos plotyje), priklausantį nuo dugno batimetrijos (žr. 3 pav.).



4. pav. Garso sklidimo nuostolių palyginimas taikant modulį su Ainslie ir kt. (2014) algoritmais bei RAMGEO „Parabolinių skaičiavimų“ modeliu (6,1 m triukšmo šaltinio gylis, 50 m jūros gylis, 125 Hz dažnis)

Fig. 4. Comparison of sound propagation loss computations: computed using Ainslie *et al.* 2014 algorithms and RAMGEO PE model (source level 6.1 m depth, 50 m sea depth, 125 Hz frequency band)

Vietovėse, kur vandens gylio sklėja, apskaičiuotoms triukšmo reikšmėms buvo pritaikytas „atkirtimo dažnio“ (dažnis, žemiau kurio garsas vandenyje nesklinda dėl bangos ilgio ir vandens gylio neigiamo santykio) filtras, kuris yra išreikštas formule:

$$f_c = \frac{C_1 / 4H}{\sqrt{1 - C_1 / C_2^2}}, \quad (7)$$

čia  $f_c$  – atkirtimo dažnis (Au, Hastings 2008).

Vandens gyliams skaičiuoti buvo panaudotas dugno batimetrijos žemėlapis (kurio tinklelis ~4,5×4,5 km), sukurtas Seifert ir kt. (2001).

Triukšmo sklidimo sąlygos vandenyje žiemos ir vasaros sezonu skiriasi. Žiemą dėl atšalusio vandens paviršinių sluoksnių garso bangos yra „pagaunamos“ į paviršinę žiemos bangonašą. Tačiau garso bangų, kurios sklinda bango-našoje, dažnių diapazonas yra priklausomas nuo vandens gylio. Ši priklausomybė modelyje apskaičiuojama pagal formulę:

$$f = \frac{C_1}{0,008 \times H^{1,5}}, \quad (8)$$

čia  $f$  – efektyvus garso bangos sklidimo dažnis žiemos sezonu (Jensen *et al.* 2011). Vasaros ir žiemos sezoniškumas buvo nustatytas išanalizavus garso greičių sezoninius matavimų rezultatus, kuriuos pateikė Lietuvos saugios laivybos administracija. Garso bangų žiemos sklidimas vyksta tuomet, kai garso greičio gradientas sudaro  $> 0,125 \text{ s}^{-1}$  ( $0,125 \text{ m/s}$  pokytis per 1 m gylio, pagal Sertlek *et al.* 2016). Kitais sezonais garso bangų sklidimas buvo prilygintas vasaros sezono sklidimui. Garso bangų žiemos sezono sklidimas taikant modelį apskaičiuojamas pagal formulę (Ainslie *et al.* 2014):

$$TL = 10Lg\left(\frac{r}{r_0}\right) + 10Lg\left[\frac{3H}{(k^2 z^2 \beta^3 r_0)}\right]. \quad (9)$$

Tyrimais nustatyta, jog laivų sukeliama triukšmo sklidimas vandens terpėje turi tam tikrą kryptingumą (Urlick 1983). Tam, kad galima būtų atspindėti kiekvieno laivo triukšmo sklidimo kryptingumą, laivo triukšmo sklidimui modeliuoti buvo pritaikyta teorinė pataisa, kuri yra išreikšta interpoliuotais garso sklidimo koeficientais (santykiu tarp didžiausios triukšmo lygio reikšmės, laivo šonuose bei likusių reikšmių), taikomais kiekvienai azimutinei kryptiai, pagal 2,5–5 kHz dažnių diapazono teorinį prekybinio laivo triukšmo sklidimo kryptingumą (Urlick 1983; Medvin, Clay 1998).

#### 4. Triukšmo duomenų statistika bei kartografavimas

Trečiasis modulis buvo suprogramuotas atlikti laivų triukšmo lygių bei šių laivų generuojamo triukšmo sklidimo numatytais atstumais skaičiavimus bei gautas jų vertes pateikti duomenų masyve, t. y. duomenų erdviniame tinklelyje,

kurio kiekvieno 100×100 m langelio centras yra hipotetinės matavimų stoties vietovė. Kiekvienoje hipotetinėje matavimų stotyje buvo apskaičiuoti logaritminiai triukšmo duomenų vidurkiai. Triukšmo lygių vidurkiai langelių centruose buvo apskaičiuoti numanant, jog kiekvienas triukšmo šaltinis yra cilindro (cilindras – numanomas vandens tūris, kuriame sklinda garso bangos bei kuris juda laivo judėjimo kryptimi) paviršinės plokštumos centre, o povandeninis triukšmas sklinda tolyn nuo triukšmo šaltinio atstumu  $\Delta r$ , visomis kryptimis cilindre, kurio viršutinė plokštuma padengia tam tikrą langelių skaičių. Šis triukšmo lygių vidurkis yra matematinis vidurkis tarp ilgiausiai bei trumpiausiai triukšmo veikiamų langelių reikšmių, apskaičiuotas pagal formulę:

$$GSL_{vid} = 10Lg\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg^{-1}\left(\frac{GSL_i}{10}\right)\right), \quad (10)$$

čia  $GSL_{vid}$  – garso slėgio verčių vidurkis,  $GSL_i$  – sumuojamų garso slėgių vertės (Guyer 2009).

Duomenų analizei buvo apskaičiuotos histogramos dviejuose pasirinktuose langeliuose (vietovėse): išskirtinėje ekonominėje zonoje (IEZ), kur yra intensyvesnė laivyba – N55.692534°, E20.266883° – bei teritorinėje jūroje – N55.914844°, E20.906178° (WGS), kur laivyba yra ne tokia intensyvi (vietovė nurodo hipotetinės matavimų stoties išdėstymo vietą) (žr. 7 pav.).

Apskaičiuotos duomenų tinklelio vertės (kiekvieno langelio centre, kurio spindulys 50 m) buvo interpoliuotos bei atvaizduotos erdviniame žemėlapyje eksperimentiniais tikslais, taikant difuzinės interpoliacijos (šiluminės interpoliacijos) metodą, programinės įrangos ARCGIS aplinkoje.

#### Rezultatai ir jų analizė

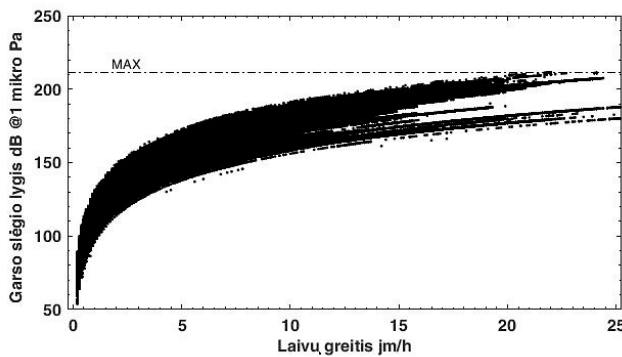
Surinkti 2015 metų AIS sistemos stočių duomenys sudarė 7,4 mln. laivų pozicijų įrašų, kurie buvo registruoti 4 minučių intervalu. Šie duomenys buvo sugrupuoti pagal laivų pavadinimus bei unikalius laivų numerius, taikant atskirai sukurtą modulį. Papildomi laivų duomenys – bruto registro tonažas (GT), laivo ilgis (m) bei laivų tipas – buvo surinkti iš interneto duomenų bazių bei susisteminti ir sugrupuoti. Iš viso buvo sugrupuota 2413 skirtingų laivų, kurių judėjimas buvo fiksuotas Lietuvos Respublikos Baltijos jūros rajone (teritoriniuose vandenyse bei IEZ). Apdorojus duomenis modulyje, atmetant laivus, kurie stovi vietoje (laivų greičiai 0,0 bei 0,1 mazgų), navigacinių įrenginių, žemai skraidančių objektų įrašus, bei mažesnių nei 20 m ilgio pramoginių (burinių) laivų įrašus, liko 1,7 mln. judančių laivų įrašų. Šių laivų duomenų santrauka pateikta 1 lentelėje.

1 lentelė. AIS laivų duomenys (SN = standartinis nuokrypis, tonažas – bruto registro tona)

Table 1. AIS ship data (SN – standard deviation, tonnage GT)

Laivų tipai	Laivų skaičius	Vid. ilgis, m ± SN	Vid. tonažas, t ± SN
Krovininiai	1621	133,7 ± 49,3	12057,1 ± 12850,0
Tanklaiviai	457	172,5 ± 95,3	26195,5 ± 23892,0
Žvejybiniai	83	29,9 ± 11,6	257,9 ± 328,7
Kiti	97	46,8 ± 28,9	1379,0 ± 2339,8
Vilkikai	60	33,5 ± 13,4	688,8 ± 2258,3
ro-ro	41	165,4 ± 35,2	20689,6 ± 9973,4
Keleiviniai	34	198,8 ± 56,7	12251,0 ± 32158,0
Žemsiurbės	20	77,6 ± 34,0	3180,0 ± 4063,9

Atlikus pirmuosius laivų generuojamų triukšmo lygių skaičiavimus buvo gautas maksimalus laivų triukšmo lygis, siekiantis 211,5 dB @1μPa, kurį sugeneravo krovininis (konteinerinis) 324,85 metrų ilgio, 105 014 bruto registro tonų (GT) laivas, judantis 22 mazgų greičiu. Bendri laivų triukšmo lygių duomenys bei jų priklausomybė nuo laivų greičių pateikti 5 pav.

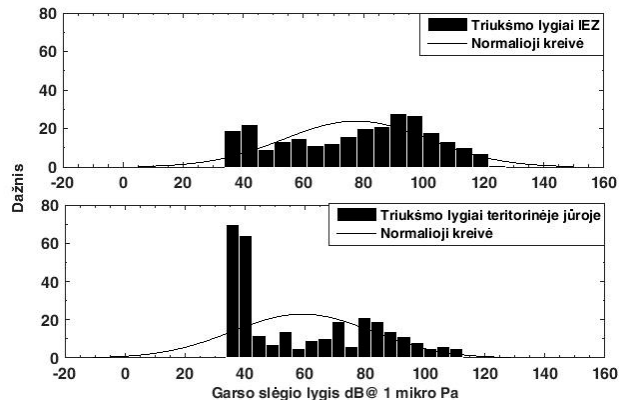


5 pav. Laivų generuojamo triukšmo bei greičio priklausomybė, apskaičiuota taikant Breeding *et al.* (1996) algoritmą

Fig. 5. Modelled ship source levels acquired using model by Breeding *et al.* (1996).

Iš gautų laivų triukšmo šaltinių duomenų matyti, kad jiems būdinga eksponentinė priklausomybė nuo laivų greičių, nepriklausomai nuo jų ilgių. Minimalus laivų triukšmo lygis siekė 53,7 dB @1μPa (žemesnis nei gamtinis fonas), kurį sugeneravo specialios paskirties 10,3 metrų ilgio, 9 bruto registro tonų (GT) laivas, judėdamas 0,2 mazgų greičiu.

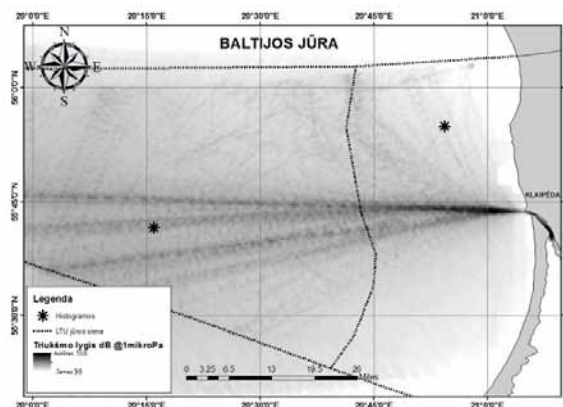
Atlikus laivų triukšmo lygių skaičiavimus, remiantis AIS duomenimis, buvo apskaičiuoti laivų generuojami triukšmo lygiai LR Baltijos jūros teritorijoje bei dviejose atrinktose vietovėse – išskirtinėje ekonominėje zonoje bei teritorinėje jūroje buvo apskaičiuotos triukšmo duomenų histogramos. Šios dvi histogramos pateiktos 6 pav.



6 pav. Triukšmo duomenų histogramos, apskaičiuotos pasirinktose dviejose vietovėse – išskirtinėje ekonominėje zonoje ir teritorinėje jūroje

Fig. 6. Data histograms computed at two chosen locations of Lithuanian Baltic sea area

Duomenų histogramos rodo skirtingą duomenų statistinį pasiskirstymą, kur histogramos yra multimodalinės. Duomenų histograma, apskaičiuota išskirtinėje ekonominėje zonoje, aiškiai rodo aukštesnius triukšmo lygius bei didesnę jų imčių skaičių. Duomenų histograma, apskaičiuota teritorinėje jūroje, rodo didelį žemesnių triukšmo lygių imčių skaičių, kuris reiškia, jog šiame langelyje buvo apskaičiuotas didesnis triukšmo lygių imčių skaičius, generuojamas tolumoje praplaukiančių laivų. Vidutiniai triukšmo lygiai šiose vietovėse pasiskirstė taip: išskirtinėje ekonominėje zonoje – 107,37 dB; teritorinėje jūroje – 95,76 dB @1 mikroPa. Šie rezultatai gali būti preliminariai palyginti su natūrinių matavimų rezultatais, surinktais Lenkijos jūrinėse teritorijose, kur povandeninio triukšmo lygiai esant 0,01–10 kHz dažniui viršijo ~100 dB, o kartais siekė ~120 dB @1 mikroPa lygį, esant laivybos intensyvumui 10–15 praplaukiančių laivų 5–15 km atstumu nuo matavimų stočių (Tegowski *et al.* 2016).



7 pav. 2015 m. sausio mėnesio eksperimentinis, interpoliuotas laivų generuojamo triukšmo verčių žemėlapis LR Baltijos jūros teritorijoje (triukšmo šaltinių gylis ~6,1 m)

Fig. 7. Modelled, experimental soundscape map of ship sources, interpolated using GIS software (source depths ~ 6.1 m)

Apskaičiavus vidutinės garso slėgio lygio vertes kiekviename duomenų tinklelio langelyje, visas duomenų tinklelis buvo perkeltas į CSV (angl. *Comma separated values*) failą ir ARCGIS programinės įrangos aplinkoje sugeneruotas 2015 m. sausio mėnesio triukšmo pasiskirstymo erdvinis žemėlapis. Šis žemėlapis pateiktas 7 pav.

## Išvados

Atliekant povandeninio triukšmo modeliavimą buvo patvirtintas plačiai taikomas laivų triukšmo lygių spektrinis algoritmas Breeding *et al.* (1996), leidžiantis prognozuoti laivų triukšmo lygius. Šis algoritmas buvo parinktas atsižvelgiant į duomenų prieinamumą duomenų bazėse bei jo sudėtingumą. Rezultatai buvo palyginti su naujesniu algoritmu, kuris reikalauja daugiau kintamųjų, tokių kaip laivo variklių skaičius, variklių masė, sraigčių dydis, laivų grimzlė. Tačiau gauti rezultatai itin nenukrypo nuo palyginamojo modelio. Triukšmo sklidimui skaičiuoti buvo suprogramuotas triukšmo sklidimo modulis, naudojantis supaprastintus sferinį, modalinį arba cilindrinį sklidimo algoritmus, kuriuos taikant skaičiuojami garso sklidimo nuostoliai priklausomai nuo sezono (vasara / žiema), bangos numerio bei dugno batimetrijos nelygumų. Sklidimo rezultatai, apskaičiuoti vasarą, buvo palyginti su ypač tiksliu RAMGEO parabolinių skaičiavimų modeliu, kurį taikant skaičiuojami garso sklidimo nuostoliai kiekvienam dažniui (1 Hz bangos plotyje). Gauti rezultatai itin nenukrypo nuo palyginamojo modelio tačiau buvo pasiektas trumpas skaičiavimų laikas plačiame 0,01–10 kHz dažnių diapazone kiekvienam 1 Hz dažniui (9991 veiksmas kiekviename garso sklidimo taške). Gauti rezultatai parodė, jog pristatomas modelis gali būti taikomas aplinkos būklės stebėsenai bei jai vertinti jūroje, tačiau turi būti patobulintas skaičiavimams atlikti standartinėse EK 1/3 oktavos dažnių juostose (0,063, 0,125 bei 2 kHz) bei sukalibruotas panaudojant rezultatus, gautus atliekant natūrinius matavimus jūroje. Apskaičiuoti garso sklidimo rezultatai taip turi būti palyginti taikant kitus modelius žiemos ir vasaros sezonais, pasirinkus iki 30 m gylį ir didesnę kaip 30 m gylį (virš termoklino / po termoklino). Papildomai modelis gali būti tikslinamas naujesniais batimetrijos duomenimis, papildomomis garso sklidimo algoritmų dugno konstantomis ir gali būti didinamas modelio tikslumas, didinant skaičiavimų laiko sąnaudas.

## Padėkos

Dėkojame Lietuvos saugios laivybos administracijos personalui už greitą AIS sistemos duomenų suteikimą.

## Literatūra

- Ainslie, M. A. 2010. Principles of sonar performance modelling, Springer – Praxis, Chichester. 707 p., in C. Audoly, C. Rousset, T. Leissing. 2014. AQUO Project—Modelling of ships as noise source for use in an underwater noise footprint assessment tool, in *INTER-NOISE and NOISE-CON. Congress and Conference Proceedings, Institute of Noise Control Engineering* 249(7): 862–871.
- Ainslie, M. A.; Dahl, P. H.; de Jong, C. A. F.; Laws, R. M. 2014. Practical spreading laws: the snakes and ladders of shallow water acoustics, in *UA2014 – 2nd International Conference and Exhibition on Underwater Acoustics*, 22–27 June, Rhodes island, Greece, 879–886.
- Au, W. L.; Hastings, C. M. 2008. *Principles of marine bioacoustics*. Springer Science+Business Media. 679 p. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-78365-9>
- Breeding Jr, J. E.; Pflug, L. A.; Bradley, M.; Walrod, M. H. 1996. *Research Ambient Noise Directionality (RANDI) 3.1 Physics Description (No.NRL/FR/7176--95-9628)*. Naval Research Lab Stennis Space Center MS. 37 p.
- Carey, W. M.; Evans, R. B. 2011. *Ocean ambient noise: measurement and theory*. Springer Science & Business Media. 263 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7832-5>
- Erbe, C.; MacGillivray, A.; Williams, R. 2012. Mapping cumulative noise from shipping to inform marine spatial planning, *The Journal of the Acoustical Society of America* 132(5): 423–428. <https://doi.org/10.1121/1.4758779>
- Erbe, C.; Williams, R.; Sandilands, D.; Ashe, E. 2014. Identifying Modelled Ship Noise Hotspots for Marine mammals of Canada's Pacific Region, *PLoS ONE* 9(3): e89820.
- ES/2010/477 Europos Komisijos sprendimas dėl geros jūrų vandenų aplinkos būklės kriterijų ir metodinių standartų.*
- Etter, C. 2012. Advanced applications for underwater acoustic modelling. Review article, *Advances in Acoustics and Vibration* 2012: 1–28. <https://doi.org/10.1155/2012/214839>
- Gervaise, C.; Aulanier, F.; Simard, Y.; Roy, N. 2015. Mapping probability of shipping sound exposure level, *The Journal of the Acoustical Society of America* 137(6): 429–435. <https://doi.org/10.1121/1.4921673>
- Guyer, J. P. 2009. *Fundamentals of acoustics*. Continuing Education and Development, Inc Course No: M02–022. 31 p.
- Hildebrand, J. A. 2009. Anthropogenic and natural sources of ambient noise in the Ocean, *Marine Ecology Progress Series* 395: 4–20. <https://doi.org/10.3354/meps08353>
- Jensen, F. B.; Kuperman, W. A.; Porter, M. B.; Schmidt, H. 2011. *Computational ocean acoustics*. Springer Science & Business Media. 794 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8678-8>
- Klusek, Z.; Lisimenka, A. 2016. Seasonal and diel variability of the underwater noise in the Baltic Sea, *The Journal of the Acoustical Society of America* 139(4): 1537–1547. <https://doi.org/10.1121/1.4944875>
- Leppäranta, M.; Myrberg, K. 2009. *Physical oceanography of the Baltic Sea*. Springer. 320 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-79703-6>
- Lurton, X. 2010. An introduction to underwater acoustics. Principles and applications, in *Chapter 2 – Underwater acoustic wave propagation*. Springer. 724 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-13835-5>

- Medvin, H.; Clay, S. 1998. *Fundamentals of acoustical oceanography*. Academic Press. 739 p.
- Marine mammal commission (MMC) 2007. *Marine mammals and noise – a sound approach to research and management*. A Report to Congress from the Marine Mammal Commission. 370 p.
- Scrimger, P.; Heitmeyer, R. M. 1988. *Acoustic source-level measurements for a variety of merchant ships (No. SAACLANTCEN-SR-143)*. Saclant ASW Research centre La Spezia (Italia).
- Seifert, T.; Tauber, F.; Kayser, B. 2001. A high resolution spherical grid topography of the Baltic Sea. 2<sup>nd</sup> ed., in *Baltic Sea Science Congress*, Stockholm 25–29 November 2001, Poster #147 [online], [cited 01 November 2015]. Available from Internet: <https://www.io-warnemuende.de/topography-of-the-baltic-sea.html>
- Sertlek, H. Ö.; Binnerts, B.; Ainslie, M. A. 2016. The effect of sound speed profile on shallow water shipping sound maps, *The Journal of the Acoustical Society of America* 140(1): EL84–EL88. <https://doi.org/10.1121/1.4954712>
- Simard, Y.; Roy, N.; Gervaise, C.; Giard, S. 2016. Analysis and modelling of 255 source levels of merchant ships from an acoustic observatory along St. Lawrence Seaway, *The Journal of the Acoustical Society of America* 140(3): 2002–2018. <https://doi.org/10.1121/1.4962557>
- Tegowski, J.; Koza, R.; Pawliczka, I.; Skóra, K.; Trzcińska, K.; Zdroik, J. 2016. Statistical, spectral and wavelet features of the ambient noise detected in the southern Baltic sea, in *23rd International Congress on Sound and Vibration*, 10–14 July, Athens, Greece, 1–6.
- Urick, R. J. 1983. *Principles of underwater sound*. New York: McGraw-Hill. 423 p.
- Wittekind, D. K. 2014. A simple model for the underwater noise source level of ships, *Journal of Ship Production and Design* 30(1): 7–14.
- Zykov, M.; Matthews Marie-Noel, R.; Chorney, N. E. 2012. *Underwater noise assessment*. Central Coastal California Seismic Imaging Project. JASCO Applied Sciences. Scientific report. 121 p.

## UNDERWATER NOISE MODELING IN LITHUANIAN AREA OF THE BALTIC SEA

D. Bagočius, A. Narščius

### Abstract

Along with rising awareness of public and scientific societies about environmental and ecological impacts of underwater noise, the need for underwater noise modelling in the shallow Lithuanian area of Baltic Sea emerged. Marine Strategy Framework Directive issues regarding underwater noise indicators refers to possibility of evaluation of Good Environmental State using underwater noise measurements as well as possibility to model underwater noise. Main anthropogenic underwater noise contributor in the Seas is the shipping lanes as known due to date, with no exclusion of Lithuanian Baltic Sea area. In this manuscript, it is presented the methods of development of simplistic underwater ambient noise model purposed for computation of underwater soundscape in shallow area of the Lithuanian Baltic Sea.

**Keywords:** Baltic Sea, shipping, underwater noise, modelling.