

# Baltijos jūros vakarinės dalies sūkurių dinamika ir jų klasifikacija

**Marija Serovaitė,**

**Donatas Pupienis**

*Vilniaus universitetas,  
M. K. Čiurlionio g. 21,  
LT-03101 Vilnius  
El. paštas: marija.serovaitė@gmail.com,  
donatas.pupienis@gf.vu.lt*

Serovaitė M., Pupienis D. Baltijos jūros vakarinės dalies sūkurių dinamika ir jų klasifikacija. *Geografija*. 2011. T. 47(1). ISSN 1392–1096.

Baltijos jūroje vertikalus maišymasis atlieka svarbų vaidmenį jūrinės ekosistemos dinamikoje. Intensyviausia vertikali turbulentinė maisto medžiagų pernaša į viršutinius sluoksnius vyksta žiemą, kai haloklina yra suardoma. Stagnacijos periodais Baltijoje vertikali vandens masės dinamika yra veikiami įvairių mechanizmų: paviršinių srovių, vidinių bangų, priekrantės vandens turbulencinio ir konvekcinio maišymosi bei sūkurių.

Straipsnio tikslas – ištirti Baltijos jūros vakarinės dalies sūkurių dinamiką ir atlikti jų klasifikaciją. Straipsnyje analizuojami natūriniai temperatūros ir druskingumo duomenys iš penkių vakarinėje Baltijos jūros dalyje veikiančių matavimo stočių bei palydoviniai jūros vandens paviršiaus duomenys.

Baltijos jūros vakarinėje dalyje iš visų aptiktų sūkurinių darinių vadinamieji užslėptieji sūkuriai sudarė vidutiniškai 30 % visų užfiksuotų sūkurių, todėl norint identifikuoti tokius darinius, tikslinga naudoti temperatūros ir druskingumo matavimų duomenis iš visų galimų šaltinių. Išanalizavus visus identifikuotus sūkurius galima teigti, kad Baltijos jūros vakarinėje dalyje vyrauja daugiausiai cikloniniai (64 % visų atvejų) vidutiniškai 18 km skersmens sūkuriai, kurių vidutinė gyvavimo trukmė siekia 72 val. Sūkuriniai dariniai, kurių temperatūros pokytis didesnis kaip 4,0 °C, turi vienareikšmią ciklonišką sukimosi pobūdį ir dažniausiai pasitaiko spalį–gegužę, todėl atsiradus tokio dydžio temperatūros pokyčiams vandens sąmaiša būna intensyvi.

**Raktažodžiai:** Baltijos jūra, vandens temperatūra, druskingumas, sūkurys

## ĮVADAS

Pirmuose G. Praudmano (G. Proudman) ir G. I. Teiloro (G. I. Taylor) darbuose sūkuriai buvo apibūdinami tiesiog kaip besisukančios vandens masės (Proudman, 1916; Taylor, 1923). Tuo tarpu skysčių dinamikoje *sūkurium* vadinamas vandenynė ar jūroje susiformavęs besisukančios masės darinys (Chelton, 2010). Sūkuriniai dariniai yra apibūdinami kaip srovės, tekančios apytikriai žiedine struktūra aplink sūkurių centrą, kurių sukimosi gali būti nukreiptas prieš arba pagal laikrodžio rodyklę (Nadiga, 1998). Sūkuriai, arba besisukančios masės darinys, skiriasi savo vandens fizinėmis savybėmis (temperatūra, druskingumu bei tankiu) nuo aplinkinių vandenų, be to, jie perneša didžiulius kiekius energijos (Robinson, Lobel, 1985; Zyryanov, 2006).

Dėl savitos hidrologijos Baltijos jūra turi pastovią stratifikaciją, vandens storumė yra padalyta haloklinos, ryškaus, vertikalus druskingumo gradiento, todėl vandens masės

atsinaujinimas gilesniuose baseinuose įmanomas tik esant prietaikai iš Šiaurės jūros per Kategato sąsiaurį (Matthäus, 2006; Miladinova, Stips, 2011). Baltijos jūroje vertikalus maišymasis yra labai nulemtas druskingų vandenų prietaikos ir atlieka kompleksinį bei svarbų vaidmenį jūrinės ekosistemos dinamikoje (Burchard ir kt., 2007; Gardiner, 2008). Jei prietaka nėra pakankamai intensyvi, sąmaiša nepasiekia senųjų priedugninių vandenų ir ventilacija nevyksta, tada Baltijos jūros priedugniniuose vandenynė gali susidaryti vandenilio sulfido junginiai, kurie yra pražūtingi ekosistemai (Burchard, 2002; Zhurbas ir kt., 2002).

Daugelis mokslininkų pažymi, jog stagnacijos periodais Baltijoje vertikali vandens masės dinamika yra veikiami įvairių mechanizmų: paviršinių srovių, vidinių bangų, priekrantės vandens turbulencinio ir konvekcinio maišymosi bei sūkurių (Zhurbas ir kt., 2004; Burchard ir kt., 2007). Iš visų minėtų dinaminų veiksnių būtent sūkuriai Baltijos jūroje iki šiol nėra pakankamai gerai ištirti dariniai, kol kas dar

mažai žinoma jų genezė, fizinės savybės, gyvavimo trukmė, judėjimo greitis skirtingų savybių vandenyse. Šio straipsnio tikslas – ištirti Baltijos jūros vakarinės dalies sūkurių dinamiką ir atlikti jų klasifikaciją.

## PRADINIAI DUOMENYS IR METODIKA

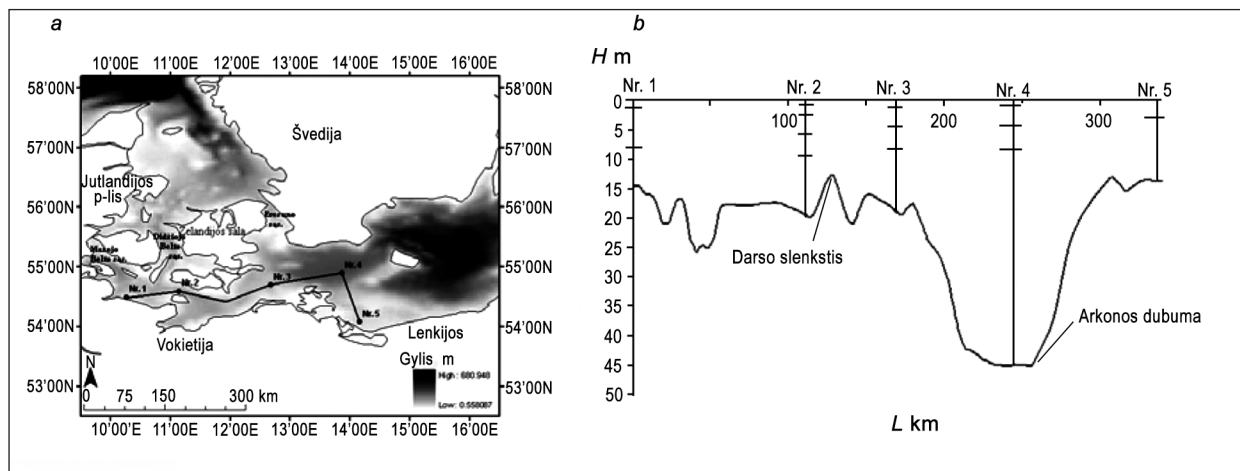
**Tyrimų rajonas** užima Baltijos jūros vakarinę akvatoriją, kuri yra apribota šiaurėje Švedijos, pietuose Vokietijos ir Lenkijos, o vakaruose Danijos salų (Zelandijos, Lolano, Fiūno) kranto linijos ir sąsiaurių (Mažojo ir Didžiojo Belto bei Eresūno). Tiriamos akvatorijos rytinė riba praeina 14°30' ilgumos (1 pav.).

Tiriamoje akvatorijoje yra išsidėčiusios 5 okeanografinės stotys (automatiniai bujai), kurios yra kaičiausioje (vandens masės savybių atžvilgiu) Baltijos jūros dalyje, kadangi čia susilieja druskingi Šiaurės jūros ir apgėlinti Baltijos jūros vandenys (Sayin, Krauss, 1995).

Tarp tyrimo stočių susidaro nemaži druskingumo skirtumai, pavyzdžiui, tarp *Kylis* ir *Fehmarno* stočių vandens druskingumas siekia 12,0 ‰, o tarp likusių vidutiniškai 8,0 ‰. Maždaug 73 % vandenų tarp Baltijos ir Šiaurės jūrų pasikei-

čia per Darso slenkstį (Lemke ir kt., 1992), kurio užnugaryje įrengta *Darso* ir *Arkonos* stotys. Vidutinis druskingumas viršutiniame 30 m sluoksnyje Arkonos baseine siekia 8,0 ‰ ir gilyn didėja iki 16,0 ‰ priedugnėje (Sayin ir kt., 1995). Paskutinė, Oderio, stotis yra įrengta Pomeranijos įlankoje, kur sąveikauja Baltijos jūros ir apgėlinti Oderio upės vandenys.

Sūkurinių darinių tyrimas atliktas remiantis 2005 m. penkių okeanografinių stočių kasvalandinių temperatūros ir druskingumo duomenų analize (1 lentelė). Temperatūros ir druskingumo duomenys atrinkti iš ICES duomenų bazės, kurią galima rasti <http://www.ices.dk/ocean/> puslapyje. Erdviniai sūkurių mastai buvo nustatyti išanalizavus Baltijos jūros vakarinės dalies (koordinatės: 55° š. pl., 54° š. pl. ir 11° r. il., 15° r. il.) (1 pav.) paviršinių temperatūrų lauką. Paviršinių temperatūrų lauką apibūdina matavimai, atlikti 451 taške. Paviršinių temperatūrų laukas sudarytas, naudojant 2005 m. kasdienius palydovinius *AVHRR Pathfinder V5* daviklio (skiriamoji geba – 0,0439453°) duomenis, kurie buvo suinterpoliuoti ArcMap 9.3 programa „Spline“ metodu. Palydoviniai paviršinių temperatūrų duomenys buvo paimti iš *PO.DAAC* archyvo, kurį galima rasti (<http://podaac-www.jpl.nasa.gov/>) svetainėje.



**1 pav.** Tyrimų rajonas. Okeanografinių stočių išsidėstymas (a). Taškais pažymėtos okeanografinės stotys (stočių pavadinimai pateikti 1 lentelėje), brūkšniu – skersinis Baltijos jūros dugno profilis (b). Vertikali ašis žymi gylį (m), horizontali – atstumą (km). Skaičiais pažymėtos okeanografinės stotys. Matavimo horizontai stotyse sužymėti brūkšniais

**Fig. 1.** Study area. Location of oceanographic stations (a). Oceanographic stations are marked with points (station names shown in Table 1), the cross-section of the Baltic Sea bottom profile is marked with dashes (b). The vertical axis indicates the depth (m) and the horizontal one the distance (km). Oceanographic stations are marked with numbers. Station measurement horizons are marked with dashes

1 lentelė. Okeanografinės stotys, reprezentuojančios vakarinę Baltijos jūros dalį, bei jose matuoti parametrai (stočių vietos parodytos 1 pav.)

Table 1. Oceanographic stations representing the western part of the Baltic Sea and the parameters measured at them (location of stations is shown in Fig. 1)

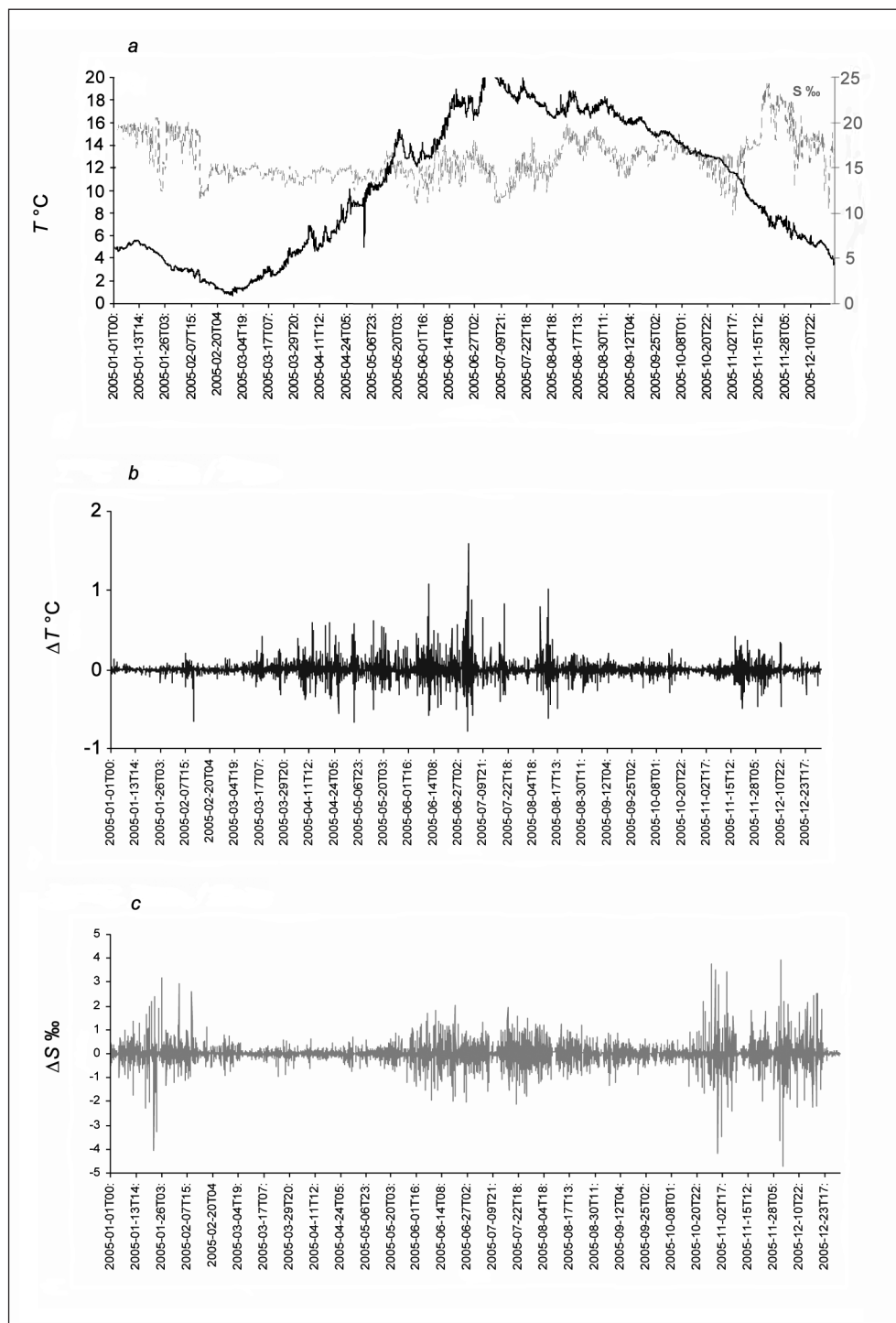
Stoties Nr. Station No.	Stotis Station name	Koordinatės Coordinates	Gylis m Depth, m	Matavimų horizontai* m Measurement horizons*, m
1	Kylis	54,50 š. pl. 10,27 r. il.	14	$T_{0'} T_{2'} T_{8'} S_8$
2	Fehmarnas	54,60 š. pl. 11,15 r. il.	19	$T_{1'} T_{3'} T_{6'} T_{10'} S_6$
3	Darsas	54,70 š. pl. 12,70 r. il.	19	$T_{2'} T_{5'} T_{7'} S_7$
4	Arkona	54,88 š. pl. 13,87 r. il.	45	$T_{2'} T_{5'} T_{7'} S_7$
5	Oderis	54,08 š. pl. 14,17 r. il.	13	$T_{3'} S_3$

\* T – temperatūra / temperature, °C; S – druskingumas / salinity, ‰.

Sūkurių identifikavimas buvo įvertintas, remiantis penkių stočių giluminiais temperatūros ir druskingumo duomenimis. Norint atskirti natūralius, nuo sezoniško priklausančius temperatūros ( $T$ ) ir druskingumo ( $S$ ) pokyčius laike buvo apskaičiuotas skirtumas tarp matavimo dabar

ir matavimo, atlikto prieš tai. Tokiu būdu gauti pokyčiai išryškino atsiradusius sūkurinius darinius (2 pav., *b*).

Atsižvelgiant į temperatūros pokyčius buvo sudaryta klasifikacija, kurioje pokyčiai suskirstyti į pusės laipsnio intervalus, tokiu būdu gauta vienuolika intervalų nuo 0,5



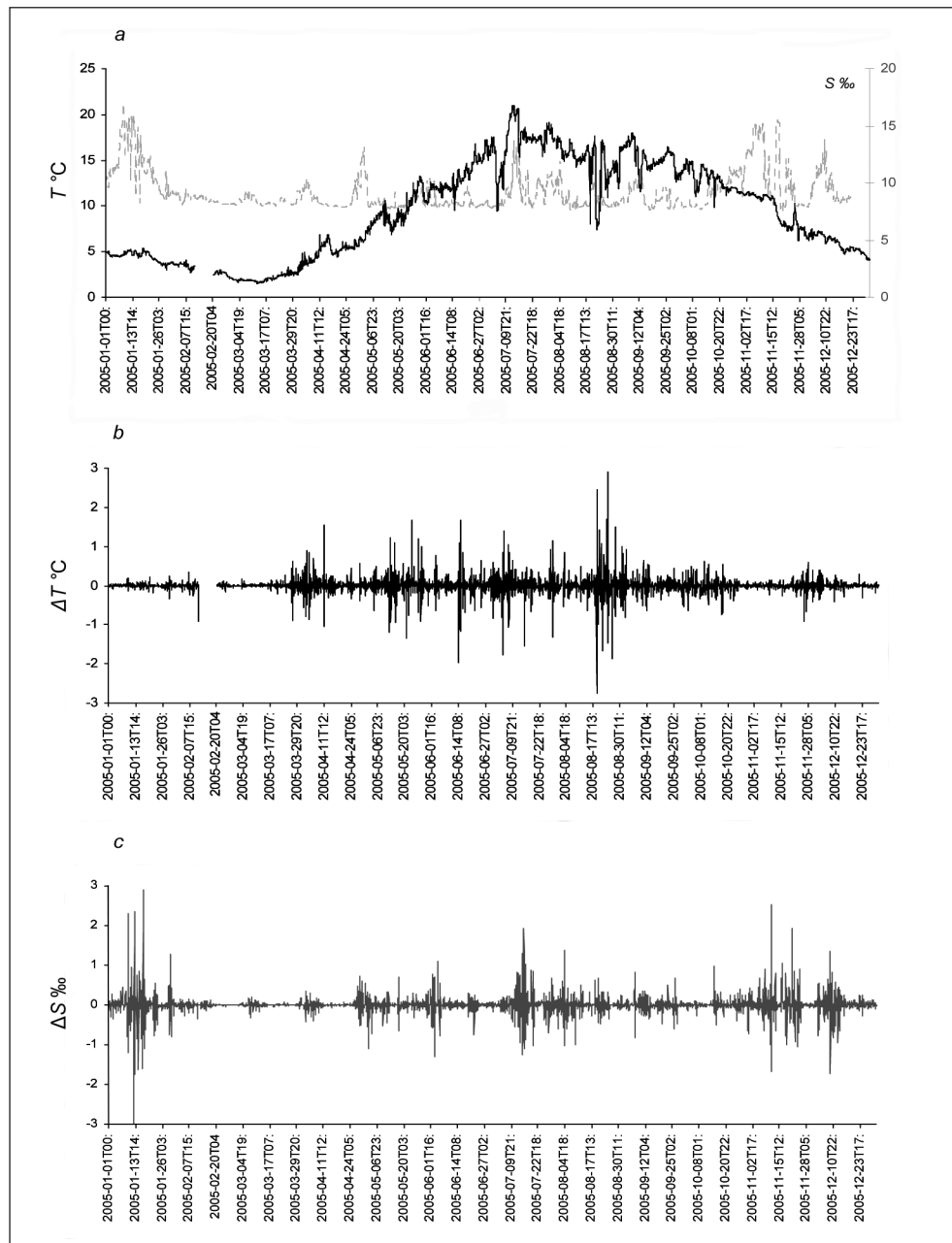
**2 pav.** Pirmos stoties (Nr. 1) vandens paviršiaus temperatūra ir druskingumas 8 m gilyje (*a*), vandens paviršiaus temperatūros pokytis (*b*), druskingumo pokytis 8 m gilyje (*c*)

*Fig. 2.* The first station (No. 1): water surface temperature and salinity at a depth of 8 m (*a*), water surface temperature variation (*b*), salinity variation at a depth of 8 m (*c*)

iki didesnių kaip 8,0 °C temperatūros pokyčių. Sudarant klasifikaciją buvo fiksuojami atvejai, kai buvo užfiksuotas atitinkamo intervalo temperatūros pokytis. Pastebėjus, jog nemažai pokyčių pasireiškia atskiruose gyliuose, buvo išskirti trys sluoksniai: paviršinis (0–3 m), vidurinis (4–6 m) ir giluminis (7–10 m). Tokiu būdu vėliau buvo galima išskirti darinius, pasireiškiančius per visus matavimų horizontus, atskirai išskiriant tik paviršiuje susidarancius ir tik giluminiuose sluoksniuose užfiksuotus pokyčius.

Išanalizavus išskirtus sūkurius vandens stovymėje, kitame etape buvo analizuojami palydoviniai vandens paviršiaus

temperatūros duomenys, kuriais remiantis buvo nustatyta sūkurio gyvavimo trukmė, dydis bei judėjimo trajektorija. Analizuojant palydovinius vandens paviršiaus temperatūros duomenis siekta patikrinti, ar tai yra tie patys dariniai, kurie buvo aptikti prieš tai atlikus kasdienių giluminių temperatūros ir druskingumo matavimų analizę. Be to, buvo patikrinta, ar aptikti dariniai išryškėja ir paviršiuje, ar vyrauja tik giluminiuose sluoksniuose, tokiu būdu identifikuojant „slaptuosius sūkurius“. Vėliau buvo išanalizuoti visi bent parą išsilaikę dariniai tiriamoje akvatorijoje per 2005 m. Aptiktas darinys buvo laikomas sūkuriumi, jei atitiko šiuos kriterijus:



**3 pav.** Trečios stoties (Nr. 3) vandens temperatūra 2 m ir druskingumas 7 m gylyje (a), vandens temperatūros pokytis 2 m (b) ir druskingumo pokytis 7 m gylyje (c)

**Fig. 3.** The third station (No. 3): water temperature at a depth of 2 m and water salinity at a depth of 7 m (a), water temperature variation at a depth of 2 m (b) and salinity variation at a depth of 7 m (c)

- turėjo centrinę ašį;
- horizontalus temperatūros skirtumas sūkurio centre ir periferijoje buvo 2,0 °C ir didesnis.

Toks temperatūros žingsnis pasirinktas atsižvelgiant į atliktą temperatūros ir druskingumo analizę gilesniuose sluoksniuose bei į gautus rezultatus. Temperatūros pokyčiui viršijus dviejų laipsnių ribą buvo nustatyta intensyvesnė cikloninių sūkurių generacija. Atsižvelgiant į gautus temperatūros pokyčius, visi nustatyti dariniai buvo suskirstyti pagal A. E. Michailovo sudarytą sūkurių klasifikaciją (Mikhailov, Romanova, 1992).

## REZULTATAI

### Vandens temperatūros ir druskingumo natūrinių matavimų analizė

Baltijos jūros vakarinės dalies 2005 m. temperatūros ir druskingumo režimas buvo artimas vidutiniam daugiamečiui, tačiau trumpalaikių, truncančių vidutiniškai keturias paras, įvairaus dydžio bei pobūdžio, temperatūros ir druskingumo pokyčių užfiksuota net 482 atvejai (2 ir 3 pav.).

Daugumą atvejų (60 %) sudarė anomalūs temperatūros pokyčiai, kurių intervalas siekė 0,5–1,0 °C (2 pav., b ir 3 pav., b). Užfiksuotų temperatūros pokyčių anomalijų atvejų skaičius mažėjo didėjant temperatūros intervalui, tačiau išskirtinai atvejų, kada anomalios temperatūros intervalas siekė 5,0–8,0 °C, užfiksuota septyni, tuo tarpu 4,0–4,5 °C ir 4,5–5,0 °C – atitinkamai trys ir du atvejai. Mažiausiai per 2005 m. Baltijos jūros vakarinėje dalyje buvo užfiksuota atvejų, kai temperatūros pokyčio intervalas siekė 4,5–5,0 °C, ir per aštuonis laipsnius – atitinkamai po du atvejus (2 pav., b ir 3 pav., b).

Analizuojant pirmos stoties vandens paviršiaus temperatūros ir druskingumo 8 m gylyje pokyčių grafikus (2 pav., b, c) galima išskirti 2005 05 17–29 d. atvejį, kai buvo užfiksuotas

temperatūros kritimas keliais laipsniais. Nuo gegužės 21 d. vakaro iki 27 d. ryto vandens temperatūra 8 m gylyje pakito 2,5 °C. Tačiau tuo pačiu metu druskingumas, priešingai, padidėjo vidutiniškai 4,0 ‰. Įdomiausia tai, kad tikėtina kupolinė struktūra nepasiekė paviršiaus, todėl viršutinio sluoksnio temperatūra nepakito. Tokie temperatūros pokyčiai išsilaikė net 6 paras, nors jiems susiniveliavus pokyčiai po kiek laiko vėl suintensyvėjo maždaug 4 paras. Tokius pokyčius gerai atspindi druskingumo kaita, kai sumažėjus temperatūrai stebimas druskingumo padidėjimas 8 m gylyje (2 pav., c).

Toks atvejis labai gerai iliustruoja literatūroje aptinkamus pavyzdžius, kai aiški šalto giluminio vandens kupolinė sistema susidaro tik tam tikrame sluoksnyje, nepasiekdama paviršinių vandenų. Tokie dariniai yra įvardijami kaip užslėptieji sūkuriai (Mikhailov, Romanova, 1992). Užslėptuosius sūkurius galima atskirti remiantis temperatūros ir druskingumo pokyčiais gilesniuose sluoksniuose bei palydoviniais vandens paviršiaus temperatūros duomenimis. Todėl analizuojant vien paviršinio sluoksnio vandens fizines savybes, galimų užslėptųjų sūkurių aptikti praktiškai neįmanoma.

Reikėtų atkreipti dėmesį į tai, jog ne visi užfiksuoti temperatūros pokyčių atvejai pasireiškė visuose matavimo horizontuose. Išanalizavus giluminius temperatūros ir druskingumo pokyčius visuose matavimo horizontuose užfiksuoti sūkuriai sudarė 46 % visų atvejų, taip pat nemažai, t. y. 36 %, atvejų buvo užfiksuoti tik gilesniuose, 7–10 m gylio, sluoksniuose. Likę 18 % visų užfiksuotų atvejų priklauso dariniams, pasireiškusiems tik paviršiniame (0–3 m) sluoksnyje (2 lentelė).

Paviršiniame sluoksnyje užfiksuojamų temperatūros pokyčių atvejų mažėja didėjant pokyčio intervalui, o pasiekus 4,5 °C ribą, anomalūs temperatūros pokyčiai apima visus matavimų horizontus ir giluminius sluoksnius. Tai rodo, kad 5,0 °C bei didesnis temperatūros pokytis vien paviršiniame sluoksnyje nepasireiškia.

2 lentelė. Baltijos jūros vakarinėje dalyje esančiose stotyse nustatyti sūkurių atvejai ir jų savybės bei pasikartojimas

Table 2. Events of eddies determined at the western Baltic Sea stations, their characteristics and recurrence

$\Delta T$ (°C) amplitudė $\Delta T$ (°C) amplitude	Per visus matavimo horizontus Throughout all mea- surement horizons	Tik paviršinia- me sluoksnyje Surface layer only	Tik giluminia- me sluoksnyje Deep layers only	Trukmė h Duration, h		$\Delta s$ (‰) kaitos ženklas ir darinio pasikartojimas (%) $\Delta s$ (‰) dynamics sign and event repetition (%)	
				vidutinė medium	maksimali maximum	(-) cikloniškas cyclonic	(+) anticikloniškas anticyclonic
0,5–1	152	63	73	33	153	47	53
1–1,5	33	6	37	47	137	43	57
1,5–2	19	4	20	66	211	38	62
2–2,5	5	5	13	84	236	71	29
2,5–3	6	2	6	91	306	63	37
3–3,5	1	1	9	121	247	78	22
3,5–4	2	3	6	91	173	67	33
4–4,5	1	1	3	46	63	100	0
4,5–5	0	0	2	135	200	100	0
5–8	3	0	3	90	125	100	0
>8	2	0	0	85	92	100	0

Temperatūros ir druskingumo matavimo vertikalėse duomenų analizė leido įvertinti susidariusius darinius ir nustatyti, ar sukūrinis darinys cikloninis (druskingumas padidėja), ar anticikloninis (druskingumas sumažėja) (2 lentelė). Tokiu būdu temperatūros ir druskingumo duomenų analizė leido atlikti pirminę sukurių klasifikaciją.

Taip pat paaiškėjo, kad sukūriniai dariniai, kurių temperatūros pokytis didesnis kaip 4 °C, turi vienareikšmiškai ciklonišką sukimosi pobūdį ir dažniausiai pasitaiko spalį–balandį (4 pav.). Tai leidžia daryti išvadą, kad atsiradus tokio dydžio pokyčiams vandens šamaiša yra intensyvi, kadangi cikloninių sukurių dėka į paviršinius sluoksnius yra iškeliami giluminiai, praturtinti maisto medžiagomis, vandenys.

Atlikta pirminė temperatūros ir druskingumo matavimo vertikalėse duomenų analizė neleido įvertinti sukurių erdvinį mastą, todėl kitame etape buvo analizuoti palydoviniai vandens paviršiaus temperatūros duomenys.

## VANDENS PAVIRŠIAUS TEMPERATŪROS NUOTOLINIŲ MATAVIMŲ ANALIZĖ

Vandens temperatūros ir druskingumo natūrinių matavimų analizė leido susieti anksčiau aptartus užfiksuotus darinius su erdviniais parametrais bei patvirtinti giluminių ir slaptųjų sukurių egzistavimą.

Išnagrinėjus 2005 m. kasdienius palydovinius paviršiaus temperatūros duomenis pastebėta, kad beveik kasdien vandens paviršiuje susidaro mažesnio (vidutiniškai 2–6 km) ar didesnio (iki 40 km) masto sukūriai su mažesniais (0,5–1,0 °C) ar didesniais (iki 7,0 °C) temperatūros skirtumais tarp sukūrio centrinės ir periferinės dalies. Čia pateikiama ryškiausias fizines savybes turinčių sukurių arba jiems iš pradžių priskirtų darinių trumpa apžvalga.

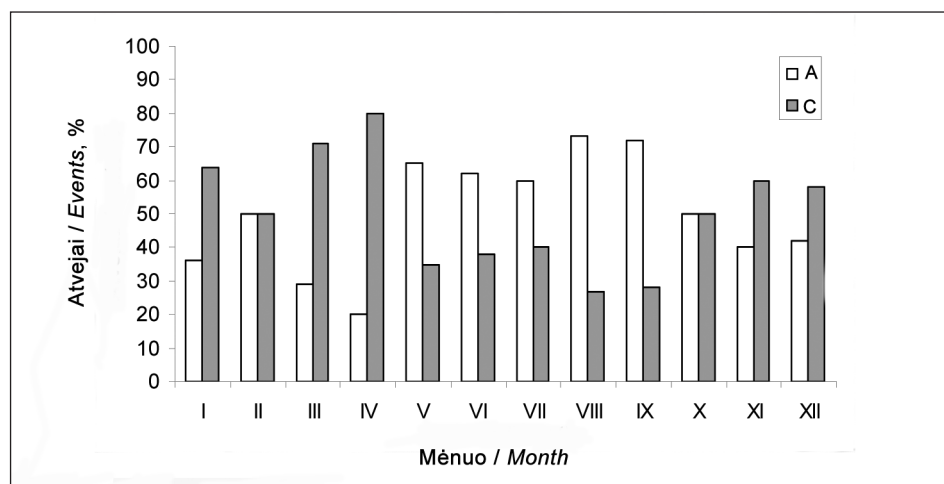
2005 m. gegužės 10–16 d. 3 stotyje 7 m gylyje buvo užfiksuotas staigus druskingumo padidėjimas 3,5 ‰ (3 pav., a, c). Jeigu ties šia stotimi susiformavo santykinai šaltas ciklo-

ninis sukūrys, fiziniuose procesuose turėtų atsispindėti šalto ir druskingo vandens kilimas. Tas kilimas fiksuojamas su dviejų dienų vėlavimu ir gegužės 14 d. užfiksuojamas paviršiniame sluoksnyje (5 pav.). Stotyje Nr. 3 užfiksuotas sukūrys gyvavo paviršiniame sluoksnyje kelias paras ir jau gegužės 16 d. jis pradėjo nykti. Paviršinių temperatūrų duomenys rodo, kad egzistavusio sukūrio sukelti temperatūros pokyčiai po kelių dienų išsilygino ir tapo artimi aplinkinių vandenių temperatūrai. Minimali temperatūra sukūrio centre gegužės 15 d. siekė 5,8 °C.

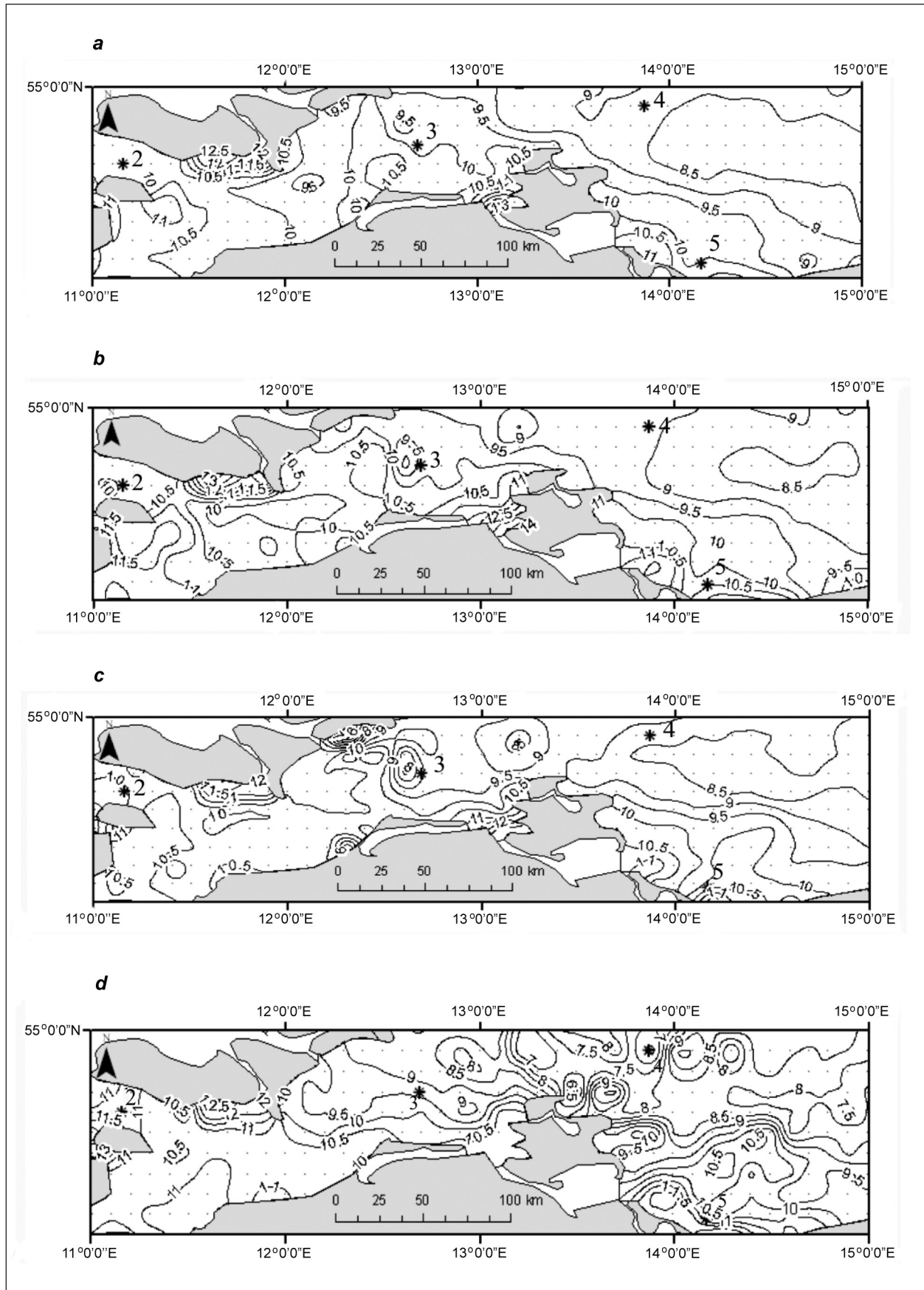
Pirmomis dienomis sukūrys nebuvo intensyvus, temperatūros skirtumai centre ir periferijoje siekė 2,0 °C. Tačiau gegužės 15 d. darinys pasiekė išsivystymo maksimumą, ir centre buvo nustatyta 6,0 °C temperatūra, o periferijoje vyravo 9,0–10,0 °C temperatūra (5 pav.). Per savo gyvavimo laikotarpį šaltasis sukūrys pirmąsias dienas migravo į šiaurę 12 km per parą greičiu, keisdamas tik savo fizines bei termines savybes, maksimalus šio sukūrio skersmuo gegužės 15 d. pasiekė apie 22 km.

Gegužės 20 d. 4 stoties rajone pasirodė nedidelio intensyvumo (temperatūros skirtumas periferijos dalyse ir sukūrio centre siekė 2,0 °C), tačiau gana ilgai išsilaikęs šaltasis sukūrinis darinys (5 pav., d). Sukūrys visą laikotarpį išliko nejudrus, o minimalią 5,9 °C temperatūrą centre pasiekė periodo pabaigoje, t. y. gegužės 20 d. Tą pačią dieną į rytus ir į pietvakarius nuo Arkonos baseino, 4 stotyje, susidarė gana ryškūs ir intensyvūs, tačiau tik parą gyvavę, šiltieji sukūriai, kurių centre temperatūra buvo vidutiniškai 4,0 °C didesnė nei jų periferijoje. Šių šiltųjų sukurių skersmuo siekė 18–20 km (5 pav., d).

Remiantis vandens paviršiaus temperatūra 2005 m. gegužės 25–31 d. 4 stoties akvatorijoje buvo užfiksuotas šiltas anticikloninis sukūrys, kuris nustatytas remiantis sumažėjusiu druskingumu 7 m gylyje ir padidėjusia temperatūra 2, 5 ir 7 m gyliuose. Tačiau išanalizavus paviršinės temperatūros lauką minėtu laikotarpiu, neužfiksuota jokio išskirtinio darinio (6 pav.). Tai galima paaiškinti tuo, kad



4 pav. Cikloninių (C) ir anticikloninių (A) sukurių pasikartojimas vakarinėje Baltijos jūros dalyje  
Fig. 4. Recurrence of cyclonic (C) and anticyclonic (A) eddies in the western part of the Baltic Sea



5 pav. Baltijos jūros vakarinės dalies vandens paviršiaus temperatūros laukai 2005 m. gegužės 12 d. (a), gegužės 14 d. (b), gegužės 15 d. (c), gegužės 20 d. (d)  
 Fig. 5. The Western Baltic Sea surface temperature field in 2005: on May 12 (a), May 14 (b), May 15 (c), May 20 (d)

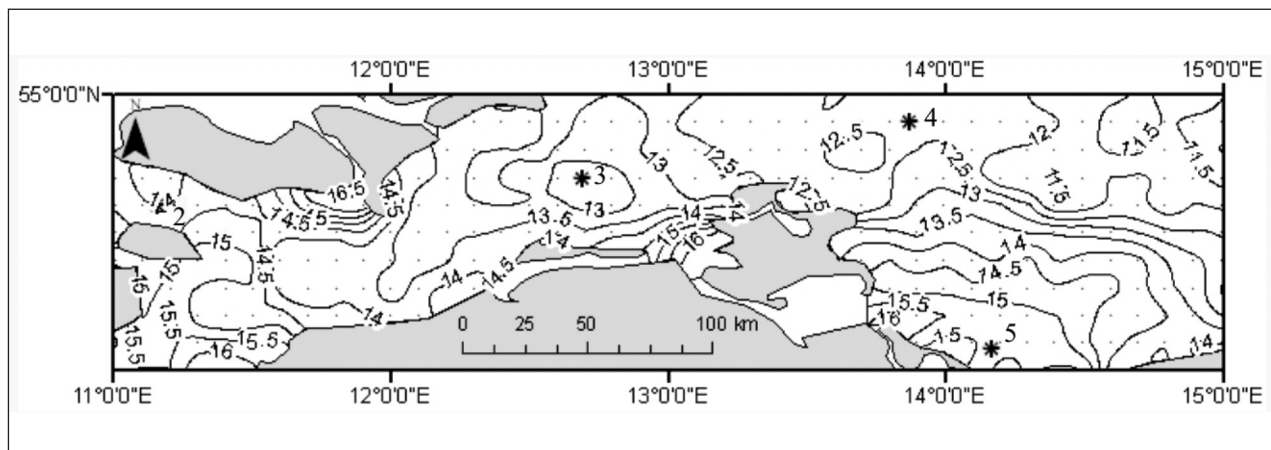
vandens paviršius jau būna homogeniškas, o temperatūra kinta palaipsniui.

Šie faktai rodo, kad mėginant aptikti sūkurinius darinius, nepakanka vien temperatūros ir druskingumo matavimų keliose vertikalėse. Tačiau reikėtų nepamiršti, jog sūkuriai gali pasireikšti tik giluminiuose sluoksniuose ir neiškilti į paviršių. Šitokie sūkuriai yra vadinami slaptaisiais sūkuriais ir jais dažniausiai būna šalti cikloniniai sūkuriai (Mikhailov ir kt., 1982; Mikhailov, Romanova, 1992). Tačiau pastarojo sūkurio, užfiksuoto 2005 m. gegužės 25–31 d., tokiam tipui priskirti nebūtų galima.

Nagrinėjant birželio 13–16 d. laikotarpį, kai 3 stotyje, kaip manyta, užfiksuotas šaltas cikloninis sūkurys (3 pav.), palydoviniai vandens paviršiaus temperatūros duomenys neparodė neįprasto sūkurinio darinio struktūros. Galbūt tokį temperatūros šuolį galėjo lemti tai, jog minėtu periodu stoties rajone susidūrė santykinai šiltesni (13,0–14,0 °C) ir santykinai šaltesni (11,0–12,0 °C) vandenys, nulėmę fronto susidarymą (7 pav.).

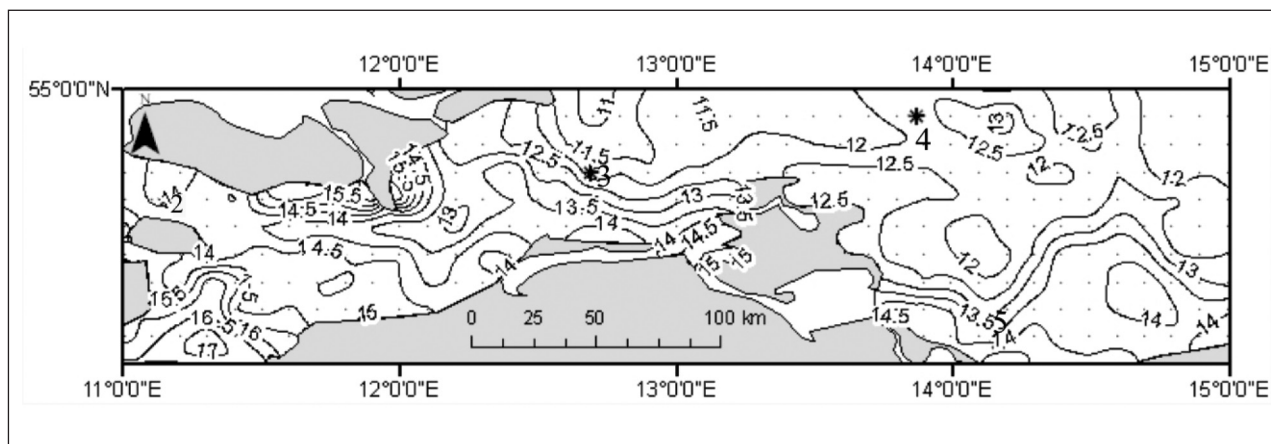
Paskutinis iš išskirtų darinių 3 stotyje pasižymėjo dažniais temperatūros ir druskingumo šuoliais giluminiuose sluoksniuose, tačiau išanalizavus paviršinės temperatūros lauką išryškėjo tik vienas darinys, kuris pasižymėjo santykinai žemesne temperatūra –12,8 °C (3 pav.). Vis dėlto būtent šį atvejį reikėtų vertinti atsargiai, kadangi rugpjūčio 9–10 d. gauti palydoviniai vandens paviršiaus duomenys nebuvo pilni, vadinasi galutinis rezultatas gali būti klaidingai interpretuotas (8 pav.).

Pereinant į šaltąjį sezoną išskirti sūkurinius darinius, remiantis palydoviniais vandens paviršiaus temperatūros duomenimis, tampa vis sunkiau dėl elementarios vandens paviršiaus temperatūros niveliacijos (9 pav.). Labiau išsiskiriantis atvejis užfiksuojamas gruodžio 4 d., kai greta vienas kito susidarė cikloninio pobūdžio sūkuriniai dariniai. Į paviršių buvo iškeltas santykinai šiltas (6,0–7,0 °C temperatūros) vanduo. Dariniai išsilaikė kelias paras ir buvo nejudrūs, sūkurių skersmuo kito nuo 17 iki 20 km.



6 pav. Baltijos jūros vakarinės dalies vandens paviršiaus temperatūros laukas 2005 m. gegužės 28 d.

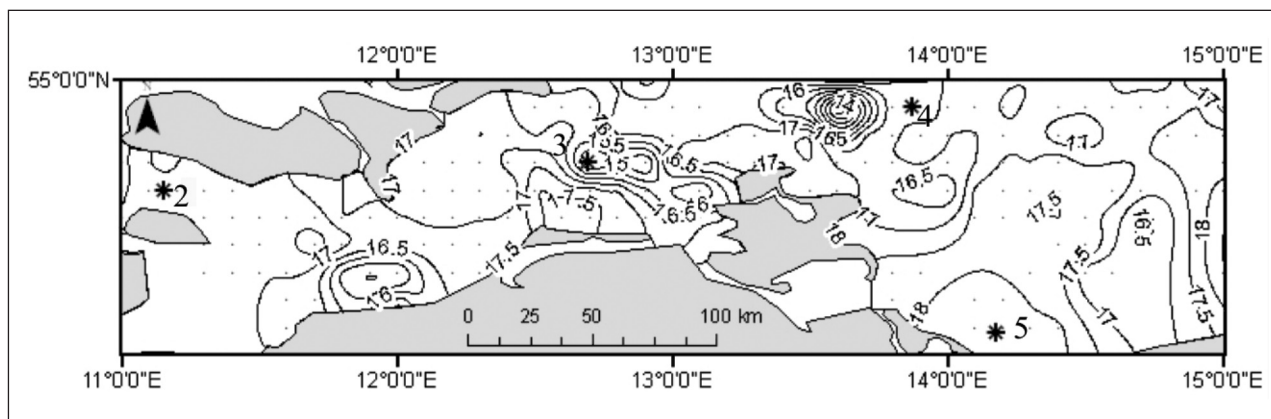
*Fig. 6. The Western Baltic Sea surface temperature field on May 28, 2005*



7 pav. Baltijos jūros vakarinės dalies vandens paviršiaus temperatūros laukas 2005 m. birželio 14 d.

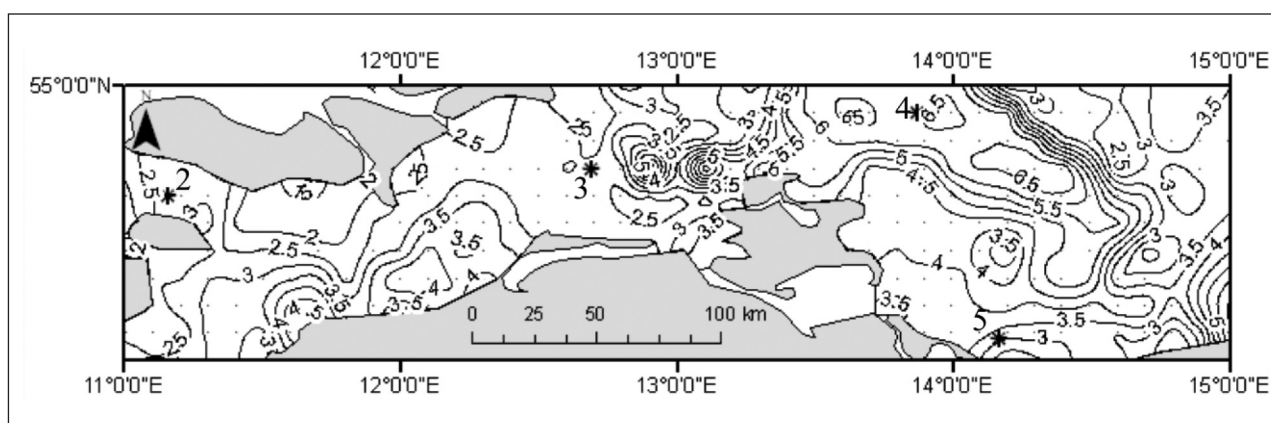
*Fig. 7. The Western Baltic Sea surface temperature field on June 14, 2005*





8 pav. Baltijos jūros vakarinės dalies vandens paviršiaus temperatūros laukas 2005 m. rugpjūčio 10 d.

Fig. 8. The Western Baltic Sea surface temperature field on August 10, 2005



9 pav. Baltijos jūros vakarinės dalies vandens paviršiaus temperatūros laukas 2005 m. gruodžio 4 d.

Fig. 9. The Western Baltic Sea surface temperature field on December 4, 2005

Aptariant visus atvejus iš karto išryškėja, kad didėjant temperatūros pokyčio intervalui, didėja ir sūkurių gyvavimo vidutinė trukmė. Tai patvirtina teoriją, kad kuo intensyvesnis darinys, tuo jo gyvavimo trukmė bus ilgesnė. Tačiau šiame tyrime tokią tendenciją užfiksuoju tik temperatūros pokyčiams esant iki 3°, o toliau didėjant temperatūros pokyčio intervalui vidutinė gyvavimo trukmė tampa labai kaiti. To priežastimi galėtų būti mažas didesnio temperatūros pokyčio atvejų skaičius, kuris gali iškreipti realią vidutinę reikšmę, tokiai išvadai patvirtinti privalo išanalizuoti ilgesnę duomenų seką.

Išanalizavus palydovinius Baltijos jūros vandens paviršiaus temperatūros duomenis (482 atvejus) buvo nustatytos vidutinės ir maksimalios sūkurių dinaminės charakteristikos: sūkurių skersmuo, gyvavimo trukmė bei sukimosi pobūdis (3 lentelė).

Analizuojant Baltijos jūros fizinius parametrus ir klasifikuojant sūkurius, buvo pastebėta, kad ne visi identifikuoti sūkurių gali būti išskirti remiantis A. E. Michailovo metodika, kadangi daugelis jų nepatektų į A. E. Michailovo sudarytą sūkurių klasifikaciją (Mikhailov, Romanova, 1992).

3 lentelė. Baltijos jūros vakarinės dalies sūkurių dinamikos charakteristikos

Table 3. Dynamics of the Western Baltic Sea eddies

Temperatūros skirtumas centre ir periferijoje °C Temperature difference at the centre and on the periphery, °C			Sūkurių gyvavimo trukmė paromis Event duration, days			Sūkurių skersmuo km Event diameter, km			Sūkurių judėjimo pobūdis, atvejai, % Event motion character, %	
min.	vid.	maks.	min.	vid.	maks.	min.	vid.	maks.	stacionarus stationary	judrus mobile
2	3	7	2	3	5	2	18	30	78	22

## 4 lentelė. Patobulinta A. E. Michailovo Baltijos jūros sūkurių klasifikacija

Table 4. Improved A. E. Michailov's classification of the Baltic Sea eddies

	Santykinai druskingas sūkurys <i>Relatively saline eddy</i>	Santykinai gėlas sūkurys <i>Relatively fresh eddy</i>
Santykinai šiltas sūkurys <i>Relatively warm eddy</i>	Cikloninis sūkurys (šaltojo periodo) <i>Cyclonic eddy (cold period)</i>	Anticikloninis sūkurys (šaltojo periodo) <i>Anticyclonic eddy (warm period)</i>
Santykinai šaltas sūkurys <i>Relatively cold eddy</i>	Cikloninis sūkurys (per visus metus) <i>Cyclonic eddy (annual)</i>	Anticikloninis sūkurys (per visus metus) <i>Anticyclonic eddy (annual)</i>

Tyrimo metu iš 30 tirtųjų buvo aptikti 8 atvejai, kurie pagal savybes būtų priskirti šiltojo periodo cikloniniams sūkuriams, tačiau pasirodė šaltuoju periodu. Todėl siūlyti A. E. Michailovo (Mikhailov, Romanova, 1992) sudarytą sūkurių klasifikaciją patobulinti ir santykinai šaltus bei santykinai druskingus sūkurius įvardyti, kaip cikloninius sūkurius, pasitaikančius per visus metus (4 lentelė).

## IŠVADOS

1. Baltijos jūros vakarinėje dalyje, iš visų aptiktų sūkurinių darinių, vadinamieji užslėptieji sūkuriai sudarė vidutiniškai 30 % visų užfiksuotų sūkurių, todėl norint identifikuoti tokius darinius, tikslinga naudoti temperatūros ir druskingumo matavimų duomenis.

2. Išanalizavus visus identifikuotus sūkurius galima teigti, kad Baltijos jūros vakarinėje dalyje vyrauja cikloniniai (64 % visų atvejų) vidutiniškai 18 km skersmens sūkuriai, kurių vidutinė gyvavimo trukmė siekia 72 valandas.

3. Sūkuriniai dariniai, kurių temperatūros pokytis didesnis kaip 4,0 °C, turi vienareikšmiškai cikloninį sukimosi pobūdį ir dažniausiai pasitaiko gegužę–spalį, todėl atsiradus tokio dydžio temperatūros pokyčiams vandens sąmaiša yra intensyvi. Cikloninių sūkurių dėka į paviršinius sluoksnius yra iškeliami giluminiai, praturtinti maisto medžiagomis, vandenys.

4. Lapkritį–balandį dažniausiai pasitaiko sūkuriniai dariniai, turintys anticikloninį sukimosi pobūdį, o jų temperatūros pokytis retai būna didesnis kaip 2,5 °C, todėl šaltuoju periodu vyrauja turbulenciniai procesai, kai paviršiniai vandenys yra nuskandinami.

5. Tikėtina, kad praplėtus tyrimų rajoną ir papildžius turimus duomenis naujesniais, ateityje bus galima išanalizuoti veiksnius, lemiančius sūkurių susidarymą, tiksliau įvertinti intensyvių sūkurių gyvavimo trukmę ir prognozuoti tolesnę jų raidą.

## Literatūra

- Burchard H. 2007. *What Mechanisms Influence Vertical Nutrient Flows in the Baltic Sea*. Leibniz Institute for Baltic Sea Research Warnemunde.
- Burchard H., Lass H. U., Mohrholz M., Umlauf L., Sellshopp J., Fiekas V., Bolding K., Arneborg L. 2002. Dynamics of medium-intensity dense water plumes in the Arkona Basin, Western Baltic Sea. *Ocean Dynamics*. 5(5-6): 391–402.
- Chelton D. 2010. Global observations of mesoscale eddies from satellite altimetry. *Oregon State University, Geophysical Research Abstracts*. 105: 19, 477–19,498.
- Gardiner L. 2008. *The swirling water of ocean eddies*. <http://www.windows.ucar.edu/>
- Lemke W., Kuijpers A., Hoffmann G., Milkert D., Atzler R. 1992. The Darss Sill, hydrographic threshold in the Southern Baltic: Late Quaternary geology and recent sediment dynamics. *Continental Shelf Research*. 14: 847–870.
- Matthäus W. 2006. The history of investigation of salt water inflows in the Baltic Sea – from the early beginning to recent results. *Meereswissenschaftliche Berichte*. 65: 1–73.
- Mikhailov A. E., Romanova E. A. 1992. Dinamika vod Baltijskogo morya. In: Terziev F.S., Rozhkov V.A., Smirnova A. I. (eds.). 1992. *The Seas of the USSR. Hydrometeorology and Hydrochemistry of the Seas of the USSR*. Vol. III. The Baltic Sea. Issue 1. Hydrometeorological Conditions. St. Petersburg: Gidrometeoizdat. 450 p.
- Mikhailov A. E., Sustavov J. V., Chernisheva E. S. 1982. *Nekotoryye rezultaty issledovaniya inertsionnykh techeniy Baltijskogo morya*.
- Miladinova S., Stips A. 2011. Modelling of salinity and temperature variation in the Baltic Sea during the last two decades. *Geophysical Research Abstracts*. 13: EGU2011–1931.
- Nadiga B. T. 1998. Idealized Studies of Mesoscale – Eddy in Ocean. *Earth and Environmental Sciences*. 80: 4273–4277.
- Proudman G. 1916. On the motion of solid body in a liquid possessing fluids. *Proceedings of the Royal Society of London. Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*. 92: 65–68.
- Robinson A. R., Lobel P. S. 1985. *Transport and Entrapment of Fish Larvae by Ocean Mesoscale Eddies and Currents in Hawaiian waters*. Center for Earth and Planetary Physics. Harvard University, Cambridge. JAV.

Gauta 2011 06 20

Priimta 2011 06 28

13. Sayin E., Krauss W. 1995. A numerical study of the water exchange through the Danish Straits. *Tellus*. 48A: 324–341.
14. Taylor G. I. 1923. Experiments on the motion of solid bodies in rotating fluids. *Proceedings of the Royal Society of London. Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*. 104(725): 213–218.
15. Zhurbas V. M., Stipa T., Mälkki P., Paka V. T., Kuzmina N. P., Sklyarov V. E. 2004. Mesoscale variability of upwelling in the South-East Baltic: Infrared images and numerical modeling. *Oceanology*. 44(5): 660–669.
16. Zhurbas V., Oh I. S., Paka V. T. 2002. Generation of mesoscale cyclonic eddies in the Baltic Sea with inflows of the North Sea water. *Oceanology*. 42(6): 805–814.
17. Zyryanov V. N. 2006. Topographic eddies in a stratified ocean. *Regular and Chaotic Dynamics*. 11(4): 491–521.

Marija Serovaitė, Donatas Pupienis

#### DYNAMICS OF EDDIES IN THE WESTERN BALTIC SEA AND THEIR CLASSIFICATION

##### Summary

The vertical mixing of the Baltic Sea water plays an important role in the dynamics of the marine ecosystem. An intensive vertical turbulent transfer of nutrients to the surface layer occurs in winter when the halocline layer is destroyed; in this way minerals get into the upper layers. Most of the scientific studies state that during stagnation periods in the Baltic Sea the water mass dynamics is influenced by various mechanisms such as surface and internal currents, coastal upwelling and downwelling, and eddies. The objective of the study was to investigate the dynamics of eddies in the western part of the Baltic Sea and to perform their new classification. The temperature and salinity data from five measuring stations in the western part of the Baltic Sea and satellite sea surface data were analysed. In the western part of the Baltic Sea, ulterior eddies made about 30% of those observed in 2005; therefore, to identify such eddies, it is important to use temperature and salinity data from all available sources. Generally, analysis of all identified eddies shows that the western part of the Baltic Sea is mainly dominated by cyclonic eddies (64% of all cases) on average 18 kilometres in diameter and with a 72-hour period of existence. Eddies whose temperature change exceeds 4.0 °C have an unambiguously cyclonic whirl nature and usually occur in October and May; due to such significant temperature changes an intensive water mixing takes place.

**Key words:** the Baltic Sea, water temperature, salinity, eddy