

TAPELIŲ EŽERO PAVIRŠINIŲ DUGNO NUOSĖDŲ TEMPERATŪRINIO
REŽIMO YPATUMAIAnastasija Moisejenkova¹, Nikolaj Tarasiuk², Aloyzas Girgždys³^{1,3}Vilniaus Gedimino technikos universitetas, ²Fizikos institutasEl. paštas: ²kolia@ar.fi.lt; ³Aloyzas.Girgzdys@vgtu.lt

Santrauka. Straipsnyje aptariamas vandens ir dugno nuosėdų sistemos šilumos apsikeitimo procesas, turintis įtakos mineralinių ir maistingų medžiagų patekimui iš dugno nuosėdų į priedugninį vandenį. Dėl šio proceso elektros laidumas dugno nuosėdų paviršiuje staigiai didėja ir pasiekia didesnę nei $400 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ reikšmę. Šilumos apsikeitimo procesas analizuojamas Tapelių ežere, įvardintame kaip „vidutiniškai šiltas“ ežeras (pagal K. Kilkų). Apibūdinamas šilumos perdavimo procesas konvekciniu būdu iš dugno nuosėdų į vandenį. Aptariamas 4°C izotermės įgilinimas į dugno nuosėdas. Paviršinių dugno nuosėdų temperatūra Tapelių ežere 2007–2009 metais siekė $3,3\text{--}3,9^\circ\text{C}$, tuo tarpu 4°C izotermė pasistūmė 20–30 cm gilyn į dugno nuosėdas.

Reikšminiai žodžiai: dugno nuosėdos, šiluminis laidumas, 4°C izotermė, termodinaminiai procesai.

Įvadas

Ežerų vandens temperatūra ir ežerų terminė stratifikacija yra daugelio mokslinių tyrimų objektas, tačiau ežerų dugno nuosėdų temperatūros režimui beveik neskiriama dėmesio. Kaip žinoma, ežerų vandens temperatūrą dažniausiai lemia šilumos kiekis, gautas iš atmosferos, tad šiuo atveju reikia pabrėžti, kad dugno nuosėdų temperatūra taip pat priklauso nuo atmosferos indėlio (Fang, Stefan 1998).

Daugelio įvairių natūralių ir žmogaus sukurtų vandens tvenkinių skiriamuoju bruožu galima laikyti stiprią vandens ir dugno nuosėdų terminę sąveiką (Mironov *et al.* 2003). Didelė šilumos dozė, gauta iš atmosferos vėlyvą pavasarį, vasarą ir ankstyvą rudenį, akumuluojama termiškai aktyviame viršutiniame paviršinių dugno nuosėdų sluoksnyje. Vėlyvą rudenį, žiemą ir ankstyvą pavasarį šiluma iš dugno nuosėdų sugrįžta atgal į vandens sluoksnį, taip sudarydama temperatūrinio vandens dugno nuosėdų sistemos ciklo histerezės pobūdžio elgseną.

Paprastai manoma, kad vasarą vyksta šilumos perdavimas iš ežero vandens į dugno nuosėdas, o žiemą – iš dugno nuosėdų į ežero vandenį. Tai tikslinga taikyti sezoniniams vidurkiams, tačiau išsami analizė parodė, kad šilumos perdavimas dugno nuosėdose yra labai dinamiškas ir gali vykti dviem kryptimis (į dugno nuosėdas ir iš jų), nepriklausomai nuo metų laiko. Visas šis procesas stipriai susietas su šilumos perdavimu iš atmosferos (Fang, Stefan 1996).

Analizuojant vandens ir dugno nuosėdų šilumos perdavimo procesą, pastebėtas neįprastas reiškinys: staigus temperatūros padidėjimas dugno nuosėdose sukelia verti-

kalųjį tankio nestabilumą šiltesniame priedugniniame vandens sluoksnyje. Toks nestabilumas gali atsirasti dėl laisvosios konvekcijos (Kirillin *et al.* 2009).

Kaip žinoma, ežero vandenyje dugno nuosėdas galima laikyti pagrindiniu maistingų medžiagų šaltiniu. Pastebėta, kad kai kuriais atvejais azoto ir fosforo kiekiai ežero vandenyje staigiai padidėja (Kamp-Nielsen 1975; Lee *et al.* 1977; Stravinskaya 1988; Sinke *et al.* 1990) rudens laikotarpiu. Nustatyta, kad pagrindinis šių medžiagų šaltinis buvo dugno nuosėdos (Goloso, Ignatieva 1999). Kad ir kaip būtų, šilumos perdavimas konvekciniu būdu gali svariai veikti daugelį dugno nuosėdų ir vandens sluoksnio apsikeitimų: poringo vandens vertikalusis judėjimas gali sukelti intensyvių tirpių medžiagų išlaisvinimą iš dugno nuosėdų, šitaip gerokai pridėdant į priedugninį vandens sluoksnį maistingų medžiagų ir mineralinių druskų (Kirillin *et al.* 2009).

Šio darbo tikslas – parodyti termodinaminių procesų svarbą tirpių medžiagų išlaisvinimo iš dugno nuosėdų į vandens sluoksnį metu ir nustatyti temperatūrinio režimo ypatumus Tapelių ežere.

Darbo metodika ir tyrimo objektas

Tyrimo objektas yra Tapelių ežeras. Šis ežeras ($54^\circ 46' 49''\text{N}$, $25^\circ 26' 29''\text{E}$) išsidėstęs miškingoje teritorijoje 16 km nuotoliu į šiaurės rytus nuo Vilniaus (1 pav.).

Tai pakankamai gilus eutrofinis ežeras su keliais dugniniais šaltiniais, priklausantis trijų ežerų grupei (Balžis, Juodis, Tapeliai). Ežero didžiausias gylis siekia 9,5 m. Dugno nuosėdų sluoksnio storis mažas ir siekia tik 1,5 m.



1 pav. Tapelių ežeras
Fig. 1. Lake Tapeliai

Vertikalieji vandens standartinių parametų (pH, temperatūra, deguonies koncentracija, elektros laidumas) profiliai Tapelių ežere periodiškai nustatomi šio ežero vandens stulpe nuo 2005 m. rudens pradžios. Tam naudotas nešiojamasis *ProfiLine Multi 197i* prietaisas su 10 m ilgio kabeliu, kuriuo galima daryti matavimus iki pat ežero dugno. Kabelis sugraduotas kas 5 cm, tai leidžia kuo tiksliau nustatyti ne tik ežero gylį, bet ir kurioje vietoje prasideda dugno nuosėdos. Šiltuoju laikotarpiu vandens standartiniai parametrai buvo matuojami iš pripučiamos valtys, šaltuoju metų laikotarpiu lede – gręžiamos skylės. Visi matavimai matuojant į ežero gylį atlikti atskaitos tašku laikant vandens paviršių.

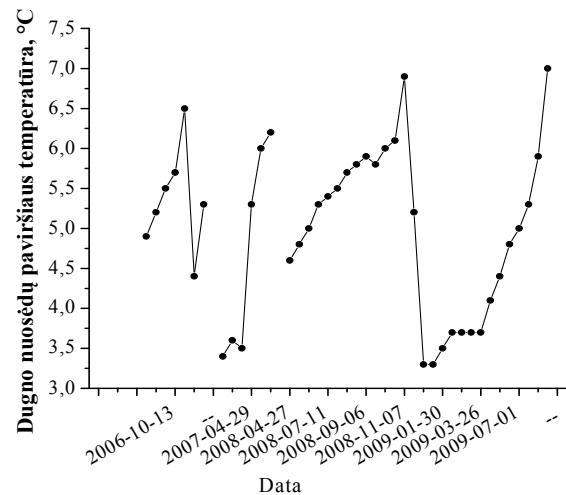
Matavimo rezultatai ir jų aptarimas

Standartinių parametų vertikalųjų profilių duomenys rodo, kad dugno nuosėdos Tapelių ežere veikia kaip šilumos akumuliatoriai rugsėjo–lapkričio mėnesiais (2 pav.). Analizuojant sezoninius dugno nuosėdų paviršiaus temperatūros pokyčius Tapelių ežero giliausioje dugninėje zonoje (9,5 m gylyje) matoma, kad pavasario laikotarpiu prasideda laipsninis dugno nuosėdų paviršiaus temperatūrinis augimas, kuris didžiausią vertę pasiekia rudens laikotarpiu. Vėliau prasideda staigus dugno nuosėdų paviršiaus mažėjimas ir tęsiasi iki žemesnės nei 4 °C temperatūros, kuri gali svyruoti žiemos laikotarpiu, tačiau 4 °C temperatūros riba nebūna viršyta.

Tapelių ežeras pagal K. Kilkaus klasifikaciją priskiriamas prie vidutiniškai šiltų ežerų. Šio ežero ypatumas

pasireiškia tuo, kad jo paviršinių dugno nuosėdų temperatūra žiemos laikotarpiu neviršija 4 °C. Dėl to 4 °C izotermė būna ne vandenyje, o dugno nuosėdose (3 pav.).

Kaip jau buvo minėta, rugsėjo–lapkričio mėnesiais prasideda šilumos kaupimasis dugno nuosėdose. Priklausomai nuo to, kaip anksti jis prasidėjo, 4 °C izotermė būna arba dugno nuosėdose, arba vandenyje. Jeigu dugno nuosėdos pradeda kaupti šilumą lapkričio mėnesį, tai izotermė būna dugno nuosėdose (3 pav.).

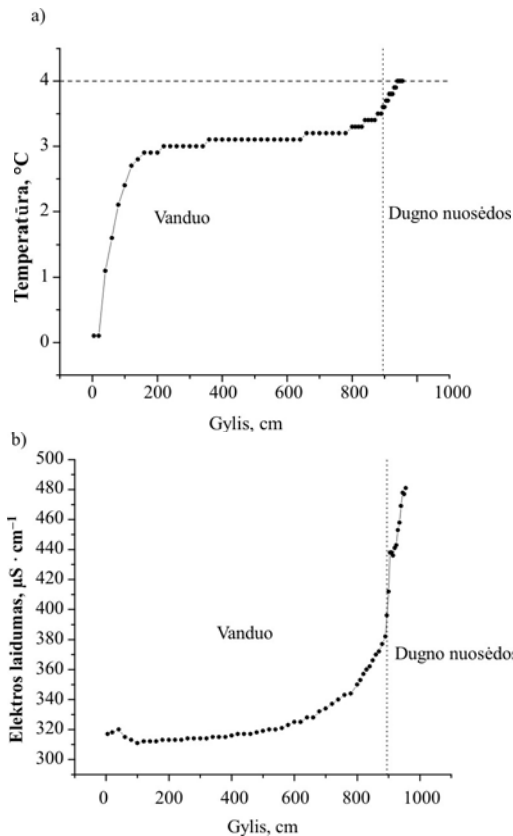


2 pav. Sezoninė dugno nuosėdų paviršiaus temperatūrų kaita
Fig. 2. The seasonal temperature course of surface sediments

Standartiniai parametrai, nustatyti 2007 02 14, rodo, kad dugno nuosėdų paviršiaus temperatūra siekia tik 3,6 °C (3 pav., a), o 4 °C izotermė tuo momentu buvo 45 cm dugno nuosėdų gylyje. 3 pav., b grafikas rodo, kad elektros laidumas priedugniniame vandens sluoksnyje pastebimai padidėjo: 6 m vandens gylyje jis siekė 325 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, o dugno nuosėdų paviršiuje – 380 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Elektros laidumo padidėjimą priedugniniame vandens sluoksnyje lemia vandens ir dugno nuosėdų sistemos šilumos apsikeitimo procesas, per kurį vanduo išsilaisvina iš dugno nuosėdų porų ir sukelia tirpių medžiagų patekimą iš dugno nuosėdų į priedugninį vandenį.

Tokie pat standartinių parametų duomenys buvo nustatyti ir 2008 12 07 (4 pav.). Jie rodo, kad dugno nuosėdų paviršiaus temperatūra siekia tik 3,3 °C, o 4 °C izotermė yra 40 cm dugno nuosėdų gylyje. 4 pav., b grafike matome, kad elektros laidumas prie dugno nuosėdų paviršiaus buvo 400 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, o 8 m gylyje – 340 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.

Vandens sluoksniai tam tikruose gyliuose, kaip ir dugno nuosėdų sluoksnis, yra persimaišę. Taip atsitinka dėl šiluminio laidumo, tačiau nereikia užmiršti, kad esant vieniems šiluminio laidumo koeficientams šilumos perdavimo greitis gali būti skirtingas. Tam gali turėti įtakos skirtinga



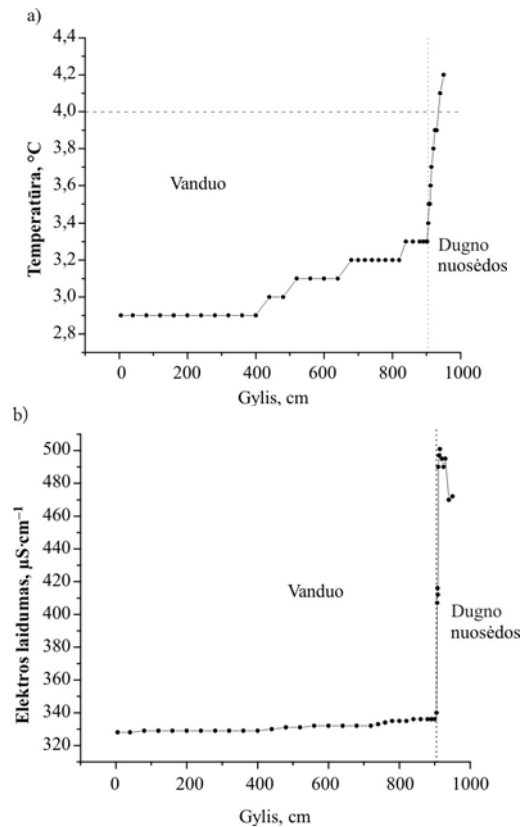
3 pav. Standartinių parametų vertikalieji profiliai: temperatūra (a) ir elektros laidumas (b), nustatyti 2007 02 14

Fig. 3. Vertical profiles of standard parameters: temperature (a) and conductivity (b), measured 2007 02 14

vandens sluoksnių mineralizacija ir pati sukaupia šilumą. Tokiuose priedugniniuose vandens sluoksniuose atsiranda konvekciniai srautai ir 4 °C izotermė nusistumia gilyn į dugno nuosėdas. Taip atsitinka tik tada, kai dugno nuosėdose būna sukauptas tam tikras šilumos kiekis. Kuo mažiau dugno nuosėdos gauna šilumos, tuo giliau yra 4 °C izotermė.

Abiejuose grafikuose pastebima temperatūrinių „laiptelių“ tendencija. Tokie temperatūriniai gradientai gali susidaryti, kai prasideda dugno nuosėdų sukauptos šilumos atidavimas. Tada temperatūrinio gradiento maksimumas pasistumia į vandens sluoksnio pusę, atsiranda plūdrumo procesai dugno nuosėdose, iš jų išstumiamas šiltesnis poringas vanduo ir temperatūra dugno nuosėdų paviršiuje didėja. Kaip jau minėta, vykstant šilumos perdavimo procesams, vandens ir dugno nuosėdų sistemoje šiltesnio poringo vandens išstūmimas iš dugno nuosėdų taip pat sukelia ir tirpių (mineralinių ir maistingų) medžiagų patekimą į priedugninį vandenį, dėl ko staigiai didėja elektros laidumo reikšmės dugno nuosėdų paviršiuje.

Artėjant pavasariui, prasideda ežero vandens persimaišymas ir temperatūra, kuris kai kuriuose vandens sluoksniuose pasiskirsto tolygiai (5 pav.).

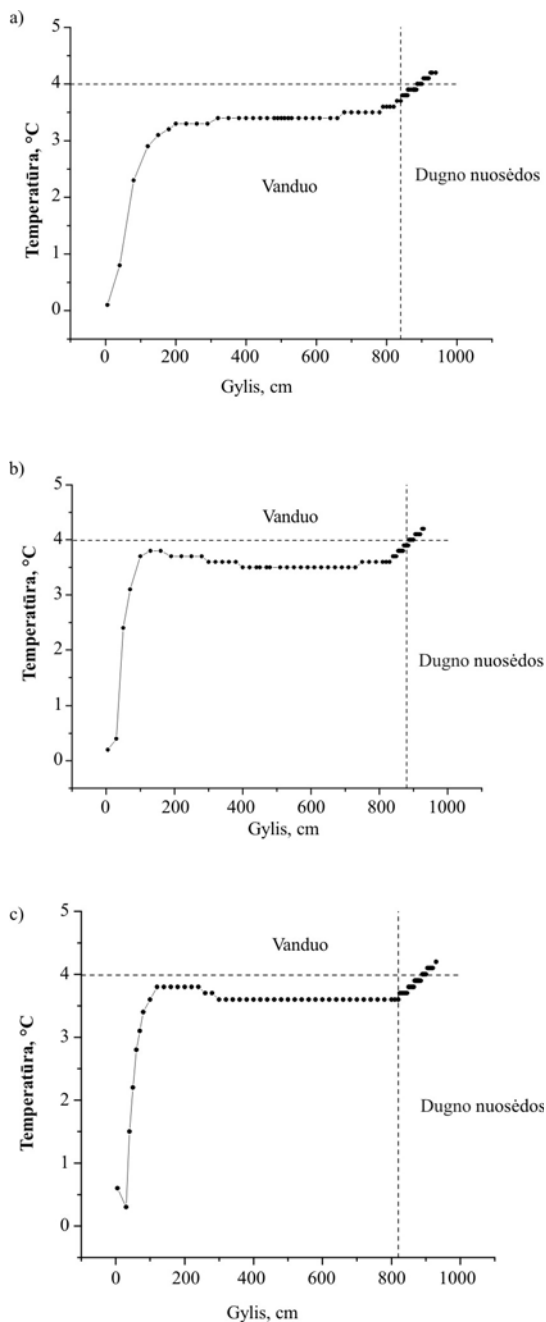


4 pav. Standartinių parametų vertikalieji profiliai: temperatūra (a) ir elektros laidumas (b), nustatyti 2008 12 07

Fig. 4. Vertical profiles of standard parameters: temperature (a) and conductivity (b), measured 2008 12 07

5 pav., a grafike matyti, kad dugno nuosėdų paviršiaus temperatūra siekia 3,9 °C, 4 °C izotermė nežymiai nusistumia į dugno nuosėdas, o temperatūrinių gradientų „laipteliai“ aiškiai suformuoti. 5 pav., b grafikas rodo, kad dugno nuosėdų paviršiaus temperatūra ir izotermės padėtis nepakito, tačiau jau prasidėjo priedugninio vandens sluoksnio persimaišymas ir liko tik vienas temperatūrinio gradiento „laiptelis“. 5 pav., c grafike matyti, kad visas priedugninio vandens sluoksnis jau persimaišęs ir temperatūrinių „laiptelių“ neliko.

Elektros laidumo vertikalieji profiliai (6 pav.) rodo, kad 2009 m. kovo mėnesį užfiksuotas elektros laidumas pasiskirstė į dvi sritis: pirmojoje – paviršinio vandens srityje elektros laidumas padidėjo nuo 200 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ iki 300 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, antrojoje – giliausios dugninės zonos srityje elektros laidumo reikšmės nereikšmingai didėja, kol dugno nuosėdų paviršiuje pradeda didėti staigiai. 6 pav., a grafike matyti, kad elektros laidumas paviršiniame vandens sluoksnyje labai žemas, tam galėjo turėti įtakos ledo ir sniego tirpimas, dėl ko paviršinis vandens sluoksnis galėjo prasiskiesti tirpstančiu vandeniu. 6 pav., b grafikas rodo staigų elektros laidumo reikšmių padidėjimą ir sumažėjimą 2 m gylyje, dėl ko galėjo atsirasti šis elektros laidumo šuolis – nežinoma.

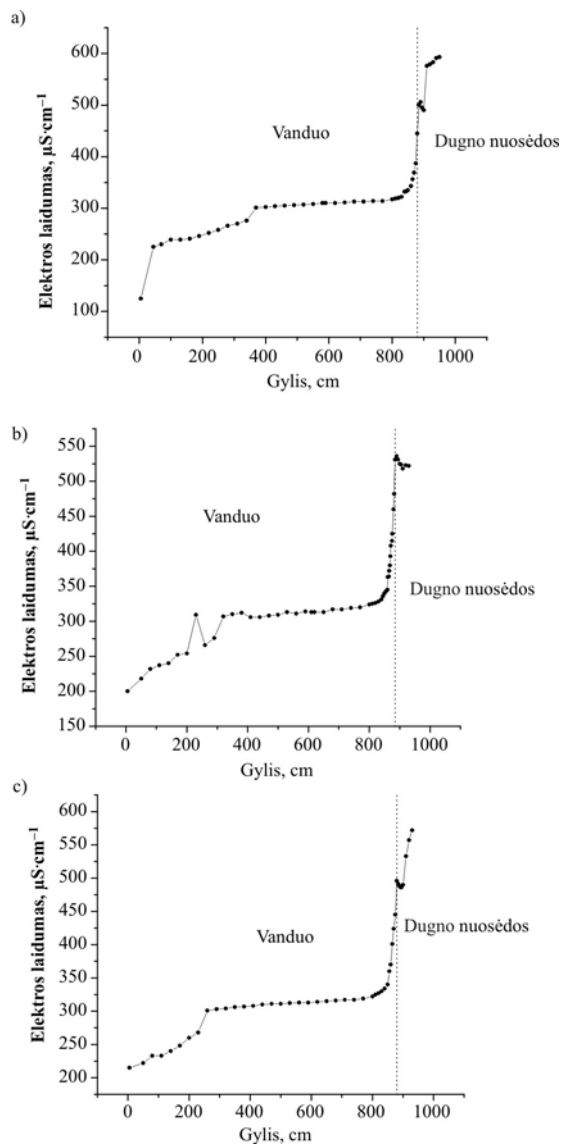


5 pav. Temperatūros vertikalieji profiliai, nustatyti 2009 03 12 (a); 2009 03 20 (b); 2009 03 26 (c)

Fig. 5. Vertical profiles of temperature, measured 2009 03 12 (a); 2009 03 20 (b); 2009 03 26 (c)

Išvados

1. Atlikta standartinių parametrų vertikalųjų profilių analizė parodė, kad šilumos perdavimo procesai, vykstantys vandens ir dugno nuosėdų sistemoje, turi reikšmės temperatūriniai gradientams susidaryti priedugniniuose vandens sluoksniuose. Dėl šios priežasties dugno nuosėdose atsiranda plūdrumo efektas ir iš jų išstumiamas šiltesnis poringas vanduo.



6 pav. Elektros laidumo vertikalieji profiliai, nustatyti 2009 03 12 (a); 2009 03 20 (b); 2009 03 26 (c)

Fig. 6. Vertical profiles of conductivity, measured 2009 03 12 (a); 2009 03 20 (b); 2009 03 26 (c)

2. Dugno nuosėdos ežeruose veikia kaip šilumos akumuliatoriai rugsėjo–lapkričio mėnesiais. Vykstant šilumos perdavimui, dėl vandens sluoksniuose esančių konvekcinųjų srautų 4 °C izotermė nusistumia gilyn į dugno nuosėdas. Kuo mažiau dugno nuosėdos gauna šilumos rugsėjo–lapkričio mėnesiais, tuo giliau yra 4 °C izotermė.
3. Vykstant šilumos perdavimo procesams dugno nuosėdų ir priedugninio vandens sluoksnio sistemoje, į priedugninį vandens sluoksnį iš dugno nuosėdų patenka ir tirpių medžiagų, didinančių priedugninio vandens sluoksnio mineralizaciją. Dėl to didėja priedugninio vandens sluoksnio elektros laidumas.

Literatūra

- Fang, X.; Stefan, H. G. 1996. Dynamics of heat exchange between sediment and water in a lake, *Water Resources Research* 32(6): 717–729. doi:10.1029/96WR00274
- Fang, X.; Stefan, H. G. 1998. Temperature variability in lake sediments, *Water Resources Research* 34(4): 1719–1727. doi:10.1029/97WR03517
- Golosov, S.; Ignatieva, N. 1999. Hydrothermodynamic features of mass exchange across the sediment–water interface in shallow lakes, *Hydrobiologia* 408/409: 153–157.
- Kamp-Nielsen, L. 1975. A kinetic approach to the aerobic sediment-water exchange of phosphorus in Lake Esrom, *Environ. Model* 1: 153–160.
- Kirillin, G.; Engelhardt, C.; Golosov, S.; Hintze, T. 2009. Basin-scale internal waves in the bottom boundary layer of ice-covered Lake Müggelsee, *Germany Aquat Ecol* 43: 641–651. doi:10.1007/s10452-009-9274-3
- Lee, G. F.; Sonzogni, W. C.; Spear, R. D. 1977. Significance of oxic vs anoxic conditions for Lake Mendota sediment phosphorus release, in H. L. Golterman (Ed.). *Interactions Between Sediments and Freshwater*. The Hague, 294–306.
- Mironov, D. V.; Golosov, S. D.; Zverev, S. I. 2003: Temperature profile in lake bottom sediments: an analytical self-similar solution, in A. Yu. Terzhevik (Ed.). *Proc. 7th Workshop on Physical Processes in Natural Waters*, Northern Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Karelia, Russia, 90–97.
- Sinke, A. J. C.; Cornelese, A. A.; Keizer, P. van Tongeren, O. F. R.; Cappenberg, T. E. 1990. Mineralization, pore water chemistry and phosphorus release from peaty sediments in the eutrophic

Loosdrecht lakes, The Netherlands, *Freshwat. Biol* 23: 587–599.

- Stravinskaya, E. A. 1988. Osobennosti gidrohimicheskogo rezhima ozera v usloviyah slabogo antropogenogo vozdeistviya, in *Metodicheskie aspekty limnologicheskogo monitoringa*. Leningrad, Nauka, 25–52 (Peculiarities of hydrochemical regime of the lake under conditions of weak anthropogenic pressure) (in Russian).

PECULIARITIES OF THE THERMAL REGIME OF THE SURFACE SEDIMENTS IN LAKE TAPELIAI

A. Moisejenkova, N. Tarasiuk, A. Girgždys

Abstract

The article discusses the process of heat transfer in the water sediment system having an impact on the input of nutrients and mineral substances from sediments to the bottom water layer. Therefore, conductivity sharply increases on the surface of bottom sediments and reaches more than $400 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. The heat exchange process is analyzed in Lake Tapeliai classified as a “temporally warm” lake (see K. Kilkus). The paper defines heat transfer from bottom sediments to water applying the convection method and describes isotherm deepening of 4 °C into sediments. The temperature of surface sediments in Lake Tapeliai was 3,3–3,9 °C in 2007–2009, whereas the isotherm of 4 °C slid 20–30 cm deeper to bottom sediments.

Keywords: sediments, heat transfer, 4 °C isotherm, thermodynamic processes.