

# Drūkšių ežero (Ignalinos AE aušintuvo) ichtiocenozės dinamika

Donatas Švitra, Giedrius Žemaitis

*Klaipėdos universitetas, Gamtos ir matematikos mokslų fakultetas*

H. Manto 84, LT-92294 Klaipėda

E. paštas: donatas@ik.ku.lt, giedrius.zemaitis@yahoo.com

**Santrauka.** Šiame straipsnyje aprašyta Drūkšių ežere egzistuojanti ekosistema. Įvedus į bendrą ichtiocenozės matematinį modelį (1)–(2) šiluminius krūvius modeliuota Drūkšių ežere ichtiocenozės dinamika Rungės–Kuto IV metodu pasinaudojus imitacinio modeliavimo programa „ModelMaker“. Gauti modelio skaitiniai sprendiniai  $F_1$ – $F_9$  palyginti su žuvų monitoringo eksperimentiniais duomenimis. Ichtiocenozės dinamika modeliuota iki 2010 metų, o prognozuota iki 2020-ųjų.

**Raktiniai žodžiai:** Drūkšių ežero matematinis modeliavimas, (Ignalinos AE aušintuvo) ichtiocenozės dinamika, ichtiocenozės matematinis modeliavimas.

## 1 Įvadas

Iki Ignalinos atominės elektrinės (IAE) veikimo pradžios ežeras buvo mezotrofinis vidutinio produktyvumo, o pirmaisiais metais po jos paleidimo tapo mažai produktyviu, su padidėjusiu vandens saprobiškumo indikatorių kiekiu. Per pirmus keturis IAE darbo metus Drūkšių ežere nustatyti eutrofizacijos proceso suintensyvėjimas. Šio ežero ekosistema yra nestabili, kuri palaipsniui transformuojasi iš mezotrofinio tipo ekosistemos į eutrofinio tipo ekosistemą. Eutrofikacijos proceso metu žuvų bendrijos labai greitai kinta [1].

Pradėjus veikti IAE stintelei, seliavai ir keletui kitų žuvų, kurių gyvenimo aplinka yra šaltos ir giles ežero vietos atsirado dar vienas faktorius mažinantis palankią gyvenimo terpę, kuris lėmė atskirų žuvų išnykimą arba gausumo sumažėjimą [5].

Drūkšių ežere iki IAE statybos pradžios vandens masių tūriai ir fiziologiškai optimalios temperatūros buvo palankios seliavai. Pradėjus eksploatuoti 1 reaktoriaus bloką šaltų vandens masių su  $T = 15^{\circ}\text{C}$  tūris sumažėjo iki 6,8% 1986 m., o paleidus 2-ąjį bloką – iki 4,3% 1987 m. 1989 m. šis tūris sumažėjo iki 3,9%, o 1990 m. sumažėjo iki 4,0%. Tuo laikotarpiu seliavos populiacija sumažėjo iki minimumo [1] 1991–1996 m. ežero ekologinės sąlygos stabilizavosi terminių sluoksnių stratifikacijos atžvilgiu, kadangi terminė zona  $T = 15^{\circ}\text{C}$  svyravo nuo 6,4 iki 8,0% viso ežero vandens tūrio. 1991–1996 m. seliavos populiacija atsistatė, kadangi sumažėjo jų mirtingumo greitis ir padidėjo produkcijos koeficientas. Todėl pagrįstai galime teigti, kad šios rūšies populiacija prisitaikė prie jai nepalankių aplinkos sąlygų, tačiau tuo metu palyginus su baziniu periodu, seliavos amžinė trukmė sumažėjo 7–3 metų [5].

Stintos gausumas 1981 m. siekė 60,8 mln. vnt., tačiau vėliau pradėjo staigiai mažėti ir 1986 m. siekė tik 1,1 mln. vnt. 1993–1997 stintos populiacija ežere buvo labai negausi. Fiziologiškai optimali temperatūra stintai, vasaros terminės stagnacijos

metu yra apie 12°C. Jos gausumo sumažėjimui daro įtaką temperatūros faktorius, priedugninio sluoksnio deguonies režimo pablogėjimas, dugno nuosėdų formavimosi tempų paspartėjimas ir epizodinių židinių atsiradimu.

Euriterminių su plačiomis termopreferendumo ribomis ir termofilinių žuvų rūšių absoliutus ir santykinis gausumas ežero ichtiocenozėje nuo pat IAE statybos pradžios nuolat didėjo. 1979–1992 m. ežero pelagialėje ypač pagausėjo ešerių: nuo 0,6–7,4 mln. vnt. 1982–1989 m. kuojos santykinis gausumas ežero litoralėje padidėjo 25%–53,3%, o plakio 1982–1989 m. pagausėjo 1–23,8%. 1982–1989 metais karšio santykinis gausumas ežero litoralėje sumažėjo 12–2,7%, pelagialėje sumažėjimo nepastebėta [4].

1992–1997 m. Drūkšių ežero žuvų rūšinė sudėtis kito labai nežymiai. Ežere dominavo euriterminės žuvų rūšys: kuoja, ešerys, aukšlė, plakis, kurių santykinė dalis bendroje ežero ichtiomasėje sudaro atitinkamai 35,5; 20; 11,2; ir 8,8% [4].

## 2 Matematinis modelis

Norėdami prognozuoti būsimą ekologinę situaciją, būtina įvertinti įvairių populiacijų dinamiką, kuri neįmanoma be matematinio modeliavimo biologinėse sistemose. Vėluojančius argumentus yra būtina įtraukti į diferencialines lygtis, aprašančias ekologinių sistemų dinamiką, kadangi vėlavimas yra esminis tokių sistemų ypatumas, apibrėžiantis svyravimų atsiradimą, jų periodą ir amplitudę [8].

Šiandien svarbu matematiškai modeliuoti Drūkšių ežero ekosistemos dinamiką ir parinkti tinkamus modelio parametrų rinkinius, kurie leistų modeliuojant prognozuoti, kokia šio ežero ekosistemos situacija bus ateityje, tam, kad galėtumėme laiku imtis tinkamų priemonių ichtiocenozės dinamikai palaikyti.

Šiame straipsnyje Drūkšių ežero ichtiocenozės dinamikai modeliuoti parinktas modelis aprašytas apibendrintomis lygtimis (2.1)–(2.2) [6]. Šis modelis sudarytas iš 9 netiesinių logistinių diferencialinių lygčių su vėluojančiais argumentais. Bendrąją prasme, šis modelis atitinka „aukos – plėšrūno“ uždavinį.

$$F'_i = r_{iF} F_i \left[ 1 + \sum_{j=1}^7 d_{ijF} \left( 1 - \frac{F_j}{K_{jF}} \right) + \sum_{j=8}^9 b_{ijF} \left( 1 - \frac{F_j}{K_{jF}} \right) + s_{iF} \left( 1 - \frac{\int_0^1 H_{iF}(u) F_i(t-u) du}{K_{iF}} \right) - \frac{1}{K_{iF}} \sum_{j=1}^{N_i^F - m_i + 1} \alpha_{ij}^F \sum_{g=1}^{n_j^F} y_{ig}^F F_i(t - h_{ig}^F - h_{ijF}) \right], \quad (1)$$

$$F'_i = r_{iF} F_i \left[ \sum_{j=1}^7 c_{ijF} \frac{F_j}{K_{jF}} + \sum_{j=8}^9 d_{ijF} \left( \sum_{j=1}^7 c_{ijF} \frac{F_j}{K_{jF}} - \frac{F_i}{K_{iF}} \right) + s_{iF} \left( 1 - \frac{\int_0^1 H_{iF}(u) F_i(t-u) du}{K_{iF}} \right) - \frac{1}{K_{iF}} \sum_{j=1}^{N_i^F - m_i + 1} \alpha_{ij}^F \sum_{g=1}^{n_j^F} y_{ig}^F F_i(t - h_{ig}^F - h_{ijF}) \right]. \quad (2)$$

Lygtis (1) aprašo taikiųjų žuvų (aukų) populiaciją  $F_1$ – $F_7$ , o (2) parodo plėšriųjų ichtiocenozę  $F_8$ – $F_9$ .

Modelyje (1)–(2)  $r_{iF}$  – tiesinio augimo koeficientas,  $b_{ijF}$  – plėšriųjų žuvų įtakos koeficientas,  $s_{iF}$  – žuvų biomasės dinamikos koeficientas, priklausantis nuo sezono,

$d_{ijF}$  – konkurencijos koeficientas tarp žuvų populiacijų,  $\alpha_{ij}^F$  – charakterizuoja įnašą tam tikrai  $i$ -tai žuvų populiacijos grupei,  $m_i$ ,  $N_i^F$  – apibūdina  $i$ -tos rūšies maksimalų ir minimalų prieaugį per metus,  $n_i^F$  –  $i$ -tos rūšies nerštų skaičius per metus,  $h_{ig}$  – laikas tarp artimiausių nerštų,  $y_{ig}^F$  – nerštų proporcijos per metus,  $r_{iF}^0$  – tiesinis Maltuziano augimo koeficientas,  $c_{ijF}$  – žuvų dalis plėšrūnų racione;  $d_{ijF}$  – plėšriųjų žuvų konkurencijos koeficientas;  $K_{iF}$  – taikiųjų žuvų talpos koeficientas,  $K_{jF}$  – plėšriųjų žuvų talpos koeficientas [6].

Lygtyse (1)–(2)  $y_{ig}^F$ ,  $h_{ijF}$  turi tenkinti tokias sąlygas:

$$\sum_g y_{ig}^F = 1, \quad h_{ijF} = m_i + j - 1. \quad (3)$$

O  $\alpha_{ij}^F$  modelyje (1)–(2) yra apibrėžti taip:

$$\sum_{j=1}^{N_i^F} \alpha_{ij}^F = 1, \quad \alpha_{ij}^F = \alpha_{i0}^F \cdot q_{iF}^{j-1}, \quad \text{kai } (0 < q_{iF} < 1). \quad (4)$$

Modelyje (1)–(2)  $r_{iF}^0$  išraiškos yra apibrėžiamos atitinkamai (5) ir (6) formulėmis

$$r_{iF}^0 = r_{iF} \left( 1 + \sum_{j=8}^9 b_{ijF} + \sum_{j=1}^9 d_{ijF} + s_{iF} \right), \quad (5)$$

$$r_{iF}^0 = r_{iF} \left( 1 + \sum_{j=8}^9 d_{ijF} + s_{iF} \right). \quad (6)$$

(2) lygtyje  $n_i^F = 0$ , kai:

$$\sum_{g=1}^{n_i^F} y_{ig}^F F_i(t - h_{ig}^F - h_{ijF}) = F_i(t - h_{ijF}). \quad (7)$$

Modelio (1) išraiškoje  $b_{ijF}$ ,  $d_{ijF}$  apibrėžtas matricas gavome tokias:

$$(b_{ijF}) = \begin{bmatrix} 0,1 & 0,1 \\ 0,08 & 0,1 \\ 0,1 & 0,08 \\ 0,08 & 0,1 \\ 0,1 & 0,1 \\ 0,08 & 0,08 \\ 0,01 & 0,01 \end{bmatrix}, \quad (d_{ijF}) = \begin{bmatrix} 0 & 0,6 & 0,1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,3 & 0 & 0,1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,1 & 0,1 & 0 & 0,2 & 0,2 & 0,05 & 0,01 & 0 \\ 0 & 0 & 0,2 & 0 & 0,3 & 0,01 & 0,01 & 0 \\ 0 & 0 & 0,1 & 0,2 & 0 & 0,01 & 0,01 & 0 \\ 0 & 0 & 0,1 & 0,05 & 0,05 & 0 & 0,01 & 0 \\ 0 & 0 & 0,1 & 0,1 & 0,1 & 0,001 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

(2) išraiškoje  $c_{ijF}$ ,  $d_{ijF}$  apibrėžtas matricas gavome:

$$d_{ijF} = \begin{bmatrix} 0 & 0,3 \\ 0,2 & 0 \end{bmatrix}, \quad c_{ijF} = \begin{bmatrix} 0,1 & 0,2 & 0,1 & 0,3 & 0,2 & 0,05 & 0,05 \\ 0,2 & 0,2 & 0,1 & 0,2 & 0,2 & 0,05 & 0,05 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Toliau lygčių sistemoje įvedame pakeitimą:

$$s_{iF} \left( 1 - \frac{\int_0^1 H_{iF}(u) F_i(t - u) du_i}{K_{iF}} \right) = s_{iF} \left( 1 - \frac{F_i(t - 0,5)}{K_{iF}} \right). \quad (10)$$

**1 lentelė.** Drūkšių ežero ichtiocenozės modelio eksperimentinės parametrų reikšmės.

$i$	$r_{iF}^0$	$K_{iF}$	$q_{iF}$	$s_{iF}$	$N_i^F$	$n_i^F$	$m_i$	$y_{ig}^F$	$h_{ig}^F$
1. Seliava	0,83	0,10	0,3	0,90	5	0	3	–	–
2. Stintelė	1,00	0,50	0,2	0,80	3	0	2	–	–
3. Karšis	0,45	0,25	0,8	0,80	20	0	9	–	–
4. Kuoja	1,00	0,30	0,7	0,75	16	0	6	–	–
5. Aukšlė	1,14	0,1	0,4	0,95	6	0	3	0,3	0,0548
6. Lynas	0,89	0,05	0,6	0,75	16	0	5	0,3	0,548
7. Pūgžlys	0,58	0,08	0,3	0,80	9	0	2	–	–
8. Lydeka	0,46	0,10	0,6	0,80	14	0	4	–	–
9. Ešerys	0,43	0,16	0,4	0,80	14	0	3	–	–

**2 lentelė.** Funkcionalinių parametrų pokyčių skaitinės reikšmės.

$i$	$\Delta K_i$	$\Delta r_i^0$	$\Delta m_i$	$\Delta N_i$	$\Delta s_i$
1. Seliava	–0,05	–0,48	0	0	–0,2
2. Stintelė	–0,49	–0,81	0	0	–0,2
3. Karšis	0,10	0,2	–1	–1	0,0
4. Kuoja	0,20	0,30	–1	–1	0,0
5. Aukšlė	0,10	0,09	–1	–1	0,0
6. Lynas	0,02	0,05	–1	–1	0,0
7. Pūgžlys	0,10	0,10	0	0	0,0
8. Lydeka	0,00	0,01	–1	–1	0,0
9. Ešerys	0,08	0,15	–1	–1	0,0

Esant bazinei ežero būklei buvo parinkti parametrai turintys realią biologinę prasmę [6].

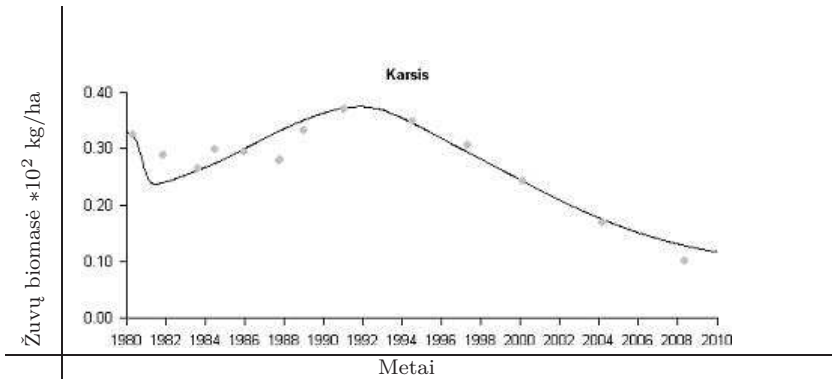
Pakitus terminai ežero būklei funkcionaliniai parametrai keitėsi tiesiškai šešių metų bėgyje. Pasikeitimo taisyklės buvo parinktos iš eksperimentinių duomenų apie šiluminius krivius tvenkiniams [6] ir pritaikytos atsižvelgus į realią žuvų biomasę kaitą. (1)–(2) modelyje funkcionaliniai parametrai:  $r_i^0$ ,  $s_i$ ,  $K_i$ ,  $m_i$ ,  $N_i$ ,  $h_{ij}$ , o priklausomieji –  $K_i$ ,  $r_i$ ,  $c_{ij}$ . Likusieji parametrai – tapatieji. Parametrų pokyčiai pateikti 2 lentelėje.

Pasinaudoję lygtimis (3)–(10) ir lygčių sistemą (1)–(2) modeliuosime skaitiniu Runge–Kuto IV metodu. Drūkšių ežero ichtiocenozės modelio eksperimentinės parametrų reikšmės pateiktos 1 lentelėje, kur  $i$  žymi žuvų populiacijos numerį.

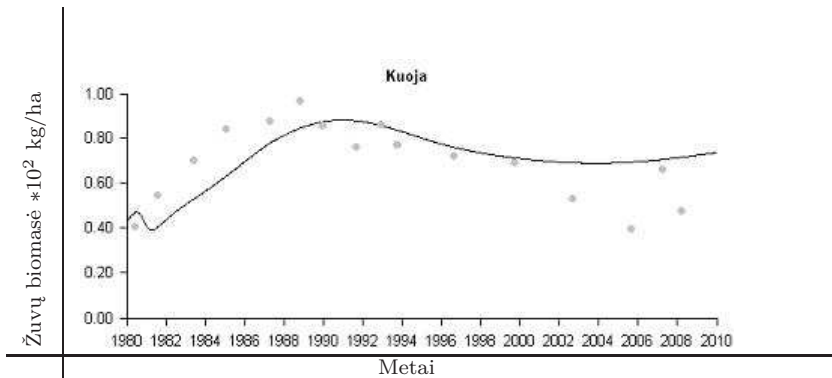
### 3 Drūkšių ežero (Ignalinos AE aušintuvo) ichtiocenozės dinamikos matematinio modeliavimo rezultatai

Naudodamiesi šilumos poveikiais įvestais į bendrą ichtiocenozės matematinį modelį (1)–(2) pateiksime imitacinio modeliavimo programa „ModelMaker“ kelis iš gautų modelio skaitinių sprendinių, kurie aprašo Drūkšių ežero ichtiocenozės biomasės dinamiką po Ignalinos AE atidarymo 1980–2010 m. t. y. pakilus bazinei ežero temperatūrai. Gautus skaitinius sprendinius  $F_1$ – $F_9$  (ištininė linija) palyginsime su žuvų monitoringo eksperimentiniais duomenimis (taškai) paimtais iš apibendrintų šaltinių [2, 1, 4, 5]. Bendram ichtiocenozės modeliui sudaryti buvo parinktos žuvys turinčios didžiausią įtaką bendrai žuvų biomasei:  $F_1$  – seliava,  $F_2$  – stintelė,  $F_3$  – karšis,  $F_4$  – kuoja,  $F_5$  – aukšlė,  $F_6$  – lynas,  $F_7$  – pūgžlys,  $F_8$  – lydeka,  $F_9$  – ešerys.

Po IAE atidarymo bendra ežero temperatūra pakilo 3–4° C, todėl labai sumažėjo šaltų ežero zonų, kurios būtinos šaltamėgėms žuvisms. Dominavusios žuvys pradėjo



1 pav. Modelio (1)–(2) karšio populiacijos dinamikos skaitinis sprendinys gautas pagal (8)–(9) ir 1 lentelėje esančias parametrų reikšmes, kai  $i = 3$ .



2 pav. Modelio (1)–(2) kuojų populiacijos svyravimo skaitinis sprendinys gautas pagal (8)–(9) ir 1 lentelėje esančias parametrų reikšmes, kai  $i = 4$ .

nykti. Seliavos populiacija po staigaus kritimo nuo 1990 metų ėmė kilti, o stintelės populiacija patyrė vienakryptį nuosmukį. Dabartinio monitoringo duomenimis, stintelės jau nebeaptinkama ir pagrįstai manoma, kad šios žuvies populiacija yra praktiškai išnykusi. Aukšlės biomasė per paskutiniuosius 30 metų patyrė du nuosmukius t. y. 1980–1990 m. ir 2000–2006 m.

1–2 pav. karšio ir kuojos biomasė pakilus ežero temperatūrai pradėjo didėti. Kuojos biomasė per pirmuosius 6 IAE eksploatavimo metus išaugo dvigubai ir ji tapo dominuojančia rūšimi. O nuo 1992 m. jos biomasė ėmė sparčiau mažėti, tačiau iki šiol ji išlieka gausiausia žuvimi. Karšio populiacija teigiamai didėjusi iki 1993, o 1994–2010 m. mažėja.

2010 metais sustabdžius IAE ežero vandens vidutinė temperatūra turėtų keliais laipsniais sumažėti, todėl turėtų padidėti šaltmėgėms palankių teritorijų ribos. Dėl šios priežasties turėtų padidėti šių žuvų biomasė, o šiltamėgių – mažėti.

Taip pat naudodami programą „ModelMaker“ tyrėme nagrinėtų žuvų populiacijos svyravimus 2010–2020 m.

Karšio biomasė 2010–2020 m. padidės 15–50 kg/ha. Kuojos populiacija 2011 m. pasieks 120 kg/ha, o 2011–2020 m. turėtų sumažėti iki 40 kg/ha. Lyno populiacija 2010–2011 m. nežymiai didės, o 2011–2020 m. sumažės 12–6 kg/ha. Lydekos biomasė didės 2010–2014 m. nuo 9 iki 18 kg/ha, o 2014–2020 m. ims mažėti ir pasieks 8 kg/ha. Ešerio biomasė laipsniškai mažės 2010–2020 metų laikotarpyje nuo 31 iki 15 kg/ha.

## 4 Išvados

Drūkšių ežero ekosistamai ištirti buvo taikoma sudėtinga savireguliacinė sistema, kurioje svarbus vaidmuo tenka vėlavimo faktoriui. Tiriant buvo panaudota metodika taikoma sprendžiant populiacijų dinamikos uždavinius.

Parinkus tam tikrą biologinę prasmę turinčias parametrų reikšmes buvo gauti skaitiniai sprendiniai aprašantys Drūkšių ežero ichtiocenozės dinamiką. Šie sprendiniai buvo gauti imitacinio modeliavimo programa „ModelMaker“ taikant skaitinį Rungės–Kuto IV metodą.

Atlikto žuvų monitoringo duomenys rodo, kad pasikeitusių ežero terminė būklė daro įtaką ichtiocenozės dinamikai. Skirtingos žuvų rūšys šį pokytį priima skirtingai. Šaltmėgės žuvis praradusios šaltąsias ežero zonas pradėjo sparčiai nykti, o šiltamėgės – gausėti.

Palyginus gautus šių modelių skaitinius sprendinius su ichtiocenozės monitoringo eksperimentiniais duomenimis buvo gautas pakankamai geras jų sutapimas, kuris leidžia naudoti tirtą modelį prognozuojant būsimą Drūkšių ežero sistemos „plėšrūnasauka“ dinamiką.

## Literatūra

- [1] A. Astrauskas, E. Bernotas ir R. Jovaiša. Žuvų rūšinės ir matematinės sudėties, gausumo bei erdvinio pasiskirstymo ypatumai. Ignalinos AE poveikis gamtai ir visuomenei: mokslinių straipsnių rinkinys / Lietuvos valstybinė mokslo programa. *Atominei energetikai ir aplinka*, Ekologijos institutas, Vilnius, pp. 175–189, 1995.
- [2] A. Astrauskas. Žuvų populiacijų kokybinio ir kiekybinio kitimo ypatumai Drūkšių ežero ekosistemos transformacijos pasekoje, Lietuvos valstybinė mokslo programa. *Atominei energetikai ir aplinka*, mokslinių ataskaitų rinkinys. I sąsiuvinis, Vilnius, pp. 187–226, 1993–1997.
- [3] E. Bernotas. *Lietuvos žuvis*. Dexma, Vilnius, 1998.
- [4] E. Bernotas. Changes in fish biomass under impact of a thermal effluent and eutrophication in lake drūkšiai. *Acta Zool. Lit.*, **12**(3):242–253, 2002.
- [5] E. Bernotas. Effects of thermal effluent and eutrophication on the functioning of vendace (*coregonus atbulal.*) population in lake drūkšiai. *Acta Zool. Lit.*, **12**(2):119–128, 2002.
- [6] К. Дучинскас, Р. Янчаускас, А. Контаутас, У. Рауцкус, Д. Швитра. Прогнозирование экологического состояния Куршского залива под воздействием некоторых антропогенных факторов. *Математические модели в биологии и медицине*, **3**:58–79, 1989, Вильнюс.
- [7] S.E. Jorgensen. *Upravlenie Ozernymi Sistemi*. Agropromizdat, Moskva, 160 c., 1985.
- [8] S.E. Jorgensen. *Fundamentals of Ecological Modeling*. 1994.
- [9] A. Kontautas U. Rauckus D. Svitra K. Ducinkas, R. Jancauskas. *Upravlenie Ozernymi Sistemi*. Agropromizdat, Moskva, 1985.

### SUMMARY

#### Drūkšiai Lake (Ignalina NPP cooler) dynamics of the ichthyocenose

D. Švitra, G. Žemaitis

This article describes the existing Drūkšiai lake ecosystem. After setting up the integrity of this mathematical model (2.1)–(2.2) thermal loads there are simulated Drūkšiai Lake dynamics of the ichthyocenose. It is done by using Runge–Kut IV method from this simulation program “Model-Maker”. The model numerical solutions of  $F_1$ – $F_9$  are compared with experimental data for the monitoring of fish. This dynamics is simulated by the year 2010 and projected to 2020.

**Keywords:** Drūkšiai lake mathematical modeling, (Ignalina NPP cooler) dynamics of the ichthyocenose, mathematical modeling of the ichthyocenose.