

Thornthwaite-Mather vandens balanso modelio taikymas Lietuvos upėms

Edvinas Stonevičius,

Dovydas Reitelaitis

*Vilniaus universitetas,
M. K. Čiurlionio g. 21,
LT-03101 Vilnius
El. paštas edvinas.stonevicius@gf.vu.lt*

Stonevičius E., Reitelaitis D. Thornthwaite-Mather vandens balanso modelio taikymas Lietuvos upėms. *Geologija. Geografija*. 2016. T. 2(3). ISSN 2351-7549.

Mėnesio laiko žingsnio vandens balanso modeliai dažnai taikomi vertinant baseinų, kurių hidrologinių bei meteorologinių duomenų prieinamumas yra mažas, nuotėkį. Tokio tipo modeliai gali būti taikomi ir tada, kai sudėtingesniems modeliams pritaikyti trūksta duomenų, leidžiančių apibūdinti modelyje vertinamus nuotėkį formuojančius procesus. Šiame darbe Thornthwaite-Mather modeliu skaičiuotas penkių skirtingo maitinimo ir baseino savybių Lietuvos upių nuotėkis, siekta įvertinti, kokios yra šio mėnesio laiko žingsnio vandens balanso modelio stipriosios ir silpnosios savybės vertinant vidutinio dydžio upių nuotėkį, būdingą regionui.

Atlikta modeliu apskaičiuoto nuotėkio jautrumo modelio parametru vertėms analizė. Tirtiesiems upių baseinams modelis taikytas Monte Karlo optimizavimo metodu nustatant geriausiai baseinuose vykstančius nuotėkio formavimosi procesus, atspindinčius modelio parametru derinius. Su pasirinktais kiekvienos upės baseinui optimaliais parametrais modelis tiksliai gali įvertinti vidutinę daugiametę sezoninę nuotėkio kaitą. Geriausiai modeliu atspindimi nuotėkio formavimosi procesai šaltuoju metų laiku ir per pavasario potvynius, o per vasaros nuosėkį ir rudens nuotėkį modelis tiksliai įvertina ne visose upėse. Daugiametę nuotėkio kaitą Thornthwaite-Mather modelis geriausiai apibūdina upėse, kurių sezoninė nuotėkio kaita yra didžiausia, o natūralus nuotėkio reguliavimas mažiausias. Modelis gali efektyviai įvertinti viso tirtojo laikotarpio spalio–balandžio mėn. nuotėkį upėse su mažu natūraliu nuotėkio reguliavimu, o maža sezonine nuotėkio kaita pasižymintį upių nuotėkį atspindi nepakankamai efektyviai.

Raktažodžiai: nuotėkis, modeliavimas, Thornthwaite-Mather modelis, jautrumo tyrimas, Monte Karlo optimizavimo metodas

ĮVADAS

Modelis – supaprastinta tiriamosios sistemos realizacija. Remiantis modeliais galima įvertinti, kaip tiriamoji gamtinė sistema reaguos į išorinį poveikį, pavyzdžiui, kaip į upės baseiną iškritę krituliai transformuosis į nuotėkį. Kritulių transformacija į nuotėkį vyks priklausomai nuo to, kokios yra baseino savybės. Tas pats efektyvių kritulių kiekis įvairaus dydžio, reljefo, žemėnaudos ir dirvožemio

baseinuose lems skirtingą nuotėkį. Norint modeliu imituoti visus baseine vykstančius procesus reikėtų turėti išsamią ir didelės raiškos informaciją apie baseino savybes ir jų pasiskirstymą. Tokia informacija retai būna prieinama, todėl dauguma hidrologinių ir vandens balanso modelių yra conceptualūs arba iš dalies conceptualūs. Tokiuose modeliuose dažniausiai laikoma, kad baseino savybės nekinta didelėse teritorijose, pavyzdžiui, pabaseinyje arba net visame baseine, o procesai,

lemiantys nuotėkio transformaciją, yra suprastinami. Paprastesnė modelio struktūra gali lemti didesnį modelio rezultatų neapibrėžtumą, tačiau sumažėja neapibrėžtumas, atsirandantis dėl ne tiksliai apibūdinamų tiriamosios sistemos savybių. Bendras modelio neapibrėžtumas priklauso nuo tiriamosios sistemos pažinimo ir prieinamo duomenų kiekio, tad konceptualių ir fizinių procesais paremtų modelių rezultatai ne retai būna panašaus tikslumo (Arnall, 1992; Xu, Singh, 1998; Poulin ir kt., 2011; Najafi ir kt., 2011).

Supaprastinant procesus, vykstančius baseine, modelio skaičiavimuose galima naudoti ilgesnius laiko žingsnius, tai lemia galimybę tyrimui panaudoti vidutinius paros, mėnesio ar metų įvesties duomenis. Nuo modelyje naudojamo laiko žingsnio priklauso, kokios laiko raiškos sistemos reakciją į išorės poveikį galėsime tirti. Jei naudosisime metų laiko žingsnį, galėsime įvertinti tik daugiamečių vertes, o naudodami mėnesio laiko žingsnio modelius galima įvertinti ir sezoninę tiriamųjų elementų kaitą. Mėnesio laiko žingsnio vandens balanso modeliai dažnai taikomi klimato poveikio tyrimams (Gleick, 1986, 1987; McCabe, Ayers, 1989; Boorman, Sefton, 1997; Jiang ir kt., 2007; Wang ir kt., 2013), nes tokio tipo modeliams pakanka kelių klimato įvesties duomenų, o didelis klimato kaitos projekcijų neapibrėžtumas dažnai viršija hidrologinių modelių struktūros ar parametrų nulemtą neapibrėžtumą (Kay ir kt., 2009; Prudhomme, Davies, 2009a, b; Poulin ir kt., 2011; Kriaučiūnienė ir kt., 2013).

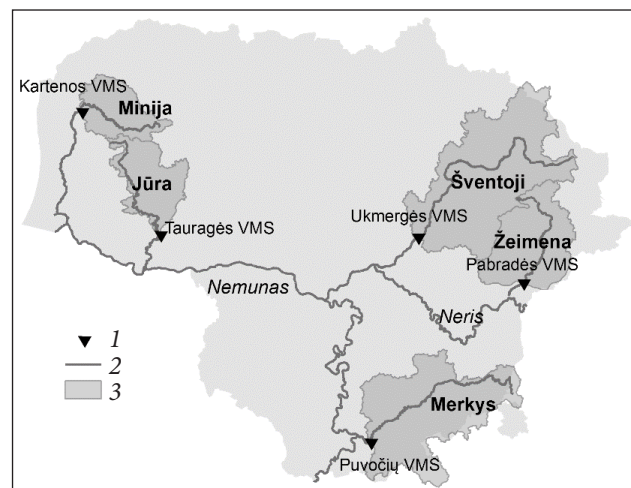
Mėnesio laiko žingsnio vandens balanso modeliai taikyti ir tiriant klimato kaitos poveikį Lietuvos ir gretimų teritorijų hidrologijai (Kilkus ir kt., 2006; Stonevičius, 2008; Stonevičius ir kt., 2008; Rimkus ir kt., 2012). Daugumoje šių tyrimų akcentuojamas nuotėkio sezoninio pasiskirstymo pokytis, nulemtas klimato kaitos, tačiau kol kas detalai neanalizuota, koks yra šių konceptualių mėnesio laiko žingsnio modelių neapibrėžtumas, stiprybės ir silpnybės.

Šiame darbe siekiama įvertinti, ar mėnesio laiko žingsnio vandens balanso modeliai tinka vertinti regionui būdingų vidutinio dydžio upių su skirtingų savybių baseiniais nuotėkį, bei nustatyti, kurie modelio rezultatai yra labiau, o kurie mažiau patikimi. Klimato kaitos poveikio hidrologijai tyrimuose informacija apie modelio rezultatų patikimumą leidžia spręsti, ar numatomi pokyčiai yra nulemti klimato kaitos, ar pačio modelio struktūros. Ty-

rimas atliktas pasitelkus vieną iš pasaulyje plačiai naudojamų ir klasikiniu laikomą Thornthwaite-Mather (toliau – TM) (Thornthwaite, Mather, 1955) vandens balanso modelį. Kituose vandens balanso modeliuose laikomasi panašios struktūros, tad šio tyrimo rezultatus, atsižvelgus į modelių struktūros skirtumus, galima pritaikyti vertinant ir kitų vandens balanso modelių rezultatų patikimumą.

DUOMENYS IR DARBO METODIKA

Vertinant modelio tinkamumą Lietuvos upių nuotėkio skaičiavimams pasirinktos penkios vidutinio dydžio Lietuvos upės: 1) Minija; 2) Jūra; 3) Šventoji; 4) Žeimenas; 5) Merkys. Tirtos baseinų dalys, esančios aukščiau ilgas debitų sekas turinčių vandens matavimo stočių (VMS) (1 lentelė). Minija ir Jūra yra Vakarų Lietuvos upės, o Šventosios, Žeimenos ir Merkio baseinai išsidėstę Rytų Lietuvoje (1 pav.). Dėl skirtingo šių Lietuvos dalių klimato, žemėnaudos ir dirvožemių skiriasi tiriamųjų upių maitinimas. Tiriamosiose vakarų upėse dominuoja maitinimas lietaus vandeniu (50–55 % metinio nuotėkio tūrio). Požeminio vandens dalis metų nuotėkyje sudaro tik apie 20–23 %. Likusi dalis – sniego tirpsmo vanduo (20–30 %). Šventosios nuotėkyje maitinimas lietaus ir sniego vandeniu sudaro apie 30 %, o maitinimas požeminiu vandeniu yra šiek tiek didesnis (40 %) nei vakarų upėse. Žeimenoje ir Merkyje požeminio vandens dalis metiniame nuotėkyje dar didesnė (60–63 %) (Kilkus, Stonevičius, 2011).



1 pav. Tiriamųjų upių baseinų pasiskirstymas (1 – vandens matavimo stotis, 2 – upės, 3 – tirtieji upių baseinai)
Fig. 1. Distribution of analyzed catchments (1 – hydrological station, 2 – rivers, 3 – analyzed catchments)

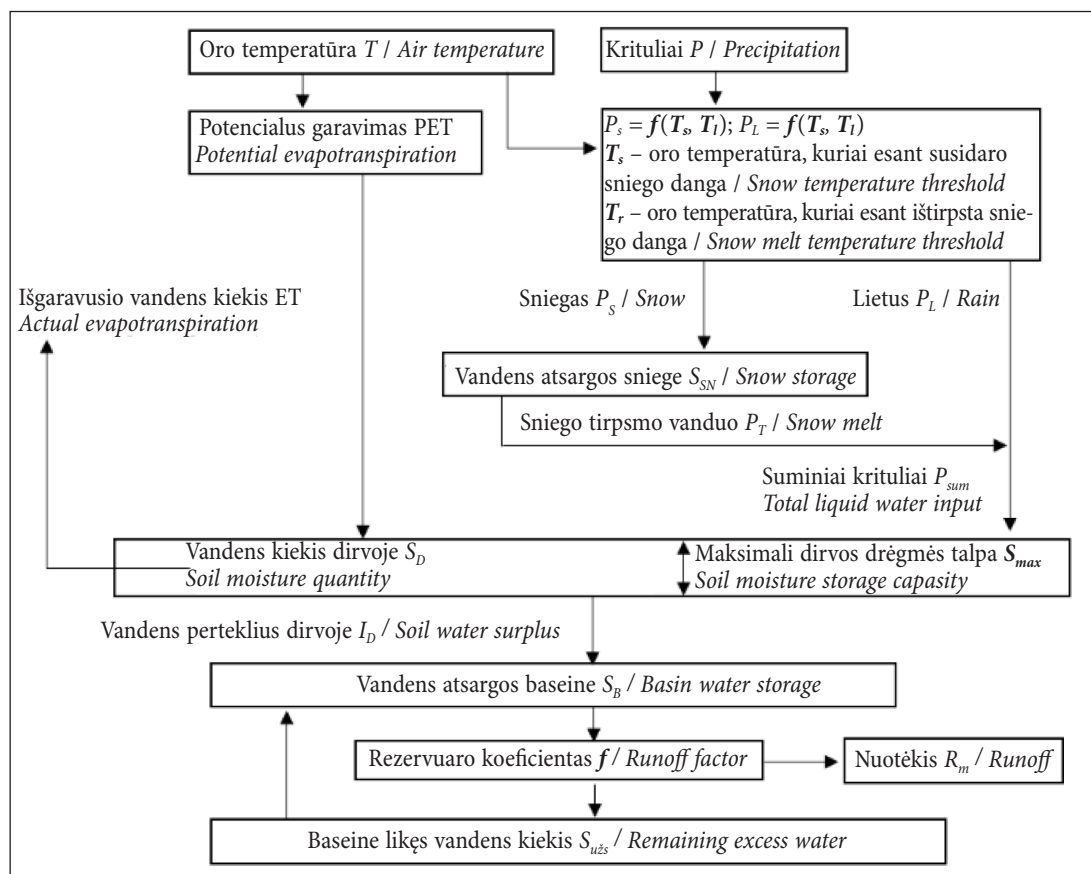
Baseino ir klimato savybės lemia, kaip upėmis nu- tekantis vanduo pasiskirstys per metus. Baseinuose su sunkesniais gruntais vyrauja paviršinis nuotėkis, todėl į baseiną patekęs vanduo greičiau nuteka, ba- seine užsilaiko mažiau vandens, ir sausmečiu nu- tėkis būna mažesnis. Baseinuose su lengvesniais gruntais, didesniu ežeringumu ir miškingumu nuotėkis būna labiau sureguliuotas, tolygiau pasi- skirstęs per metus (1 lentelė).

Šiame darbe taikyta TM modelio modifikacija pritaikyta Lietuvos sąlygomis (Stonevičius, 2009) (2 pav.), joje potenciali evapotranspiracija verti- nama pagal C. W. Thornthwaite (1948) pasiūlytą metodą, o kritulių fazinė sudėtis ir sniego dangos tirpsmo rodikliai apskaičiuojami iš mėnesio kri- tulių sumos ir vidutinės oro temperatūros duo- menų, remiantis temperatūros indekso metodu (Okmura, 2001).

1 lentelė. Tirtųjų upių baseinų dydžiai ir nuotėkio sureguliuavimo koeficientai (Kilkus, Stonevičius, 2011)

Table 1. Area and natural runoff regulation coefficients of analyzed catchments (Kilkus, Stonevičius, 2011)

Upė River	Žemutinis tirtojo baseino skerspjūvis <i>The lower cross-section of the catchment</i>	Baseino plotas km ² <i>Catchment area, km²</i>	Natūralaus nuotėkio reguliavimo koeficientas φ <i>Natural runoff regulation coefficient φ</i>
Minija	Kartenos VMS	1 230	0,58
Jūra	Tauragės VMS	1 664	0,50
Šventoji	Ukmergės VMS	5 440	0,70
Žeimena	Pabradės VMS	2 580	0,82
Merkys	Puvočių VMS	4 300	0,85



2 pav. Thornthwaite-Mather modelio su sniego modulių konceptualioji diagrama (paryškintu šriftu pažymėti modelio parametrai)

Fig. 2. Conceptual diagram of Thornthwaite-Mather model with incorporated snow module (model parameters are noted in bold)

Taikant matematinę modelį konkrečiam baseinui atliekamas modelio kalibravimas, kurio metu parenkami tokie modelio parametrai (lygčių koeficientai), su kuriais modelio reakcija į išorės veiksnių poveikį yra panašiausia į tiriamosios sistemos reakciją. Naudojamoje TM modelio modifikacijoje yra keturi kalibruojami parametrai: maksimali dirvos drėgmės talpa S_{max} (mm), rezervuaro koeficientas f , oro temperatūros riba T_L (°C), aukščiau kurios iškritę krituliai yra lietus, ir oro temperatūros riba T_S (°C), žemiau kurios visi iškritę krituliai yra sniegas. Maksimali dirvos drėgmės talpa S_{max} naudojama skaičiuojant tikrąjį garavimą. Vertinama, kiek įsotintas vandeniu yra dirvožemis konkretų mėnesį ir kokia yra tą mėnesį klimato sąlygų nulemta potenciali evapotranspiracija. Jei vandens atsargos dirvoje yra lygios maksimaliai dirvos drėgmės talpai, tada garavimas iš baseino paviršiaus yra lygus potencialiai evapotranspiracijai. Rezervuaro koeficientas f apibūdina, kokia dalis baseine sukauptų vandens atsargų nutekės. Pagal T_L ir T_S parametrus apskaičiuojama kritulių fazinė sudėtis ir sniego dangoje sukauptos vandens atsargos.

TM modelio kalibravimas buvo atliktas naudojant Monte Karlo metodą (Metropolis, Ulam, 1949). Šis metodas paremtas didelio skaičiaus atsitiktinių modelio parametrų verčių derinių generavimu ir vertinimu, kurie iš šių sugeneruotų derinių yra optimaliausi taikant modelį konkrečiam baseinui. Generuojant parametrų derinius būtina apibrėžti galimų parametrų verčių ribas. Parametrų, susijusių su agregatine kritulių būseną ir sniego dangos rodikliais, ribos buvo pasirinktos atsižvelgiant į J. McCabe, S. L. Markstrom (2007) rekomenduojamas vertes T_L [1,0; 6,0], T_S [-8,0; -2,0]. Sudarant parametrų derinius naudotos visos galimos rezervuaro koeficiento f reikšmės [0; 1]. Apatinė rezervuaro koeficiento vertės riba ($f = 0$) atitinka situaciją, kai baseine sukauptas vanduo visiškai nenuiteka, o nuotėkį formuoja tik paviršinis nuotėkis. Viršutinė rezervuaro koeficiento vertės riba ($f = 1$) būtų pasiekama tada, kai visos baseine sukauptos vandens atsargos galėtų nutekėti upe per vieną mėnesį. Paskutinio parametro maksimalios dirvos drėgmės talpos S_{max} žemutinė riba pasirinkta 0 mm, o viršutinė – 500 mm.

TM modelio tinkamumas atspindėti konkretaus baseino nuotėkio formavimąsi vertintas pa-

sitelkiant modelio tinkamumo rodiklius. Bendras TM modelio tinkamumas įvertintas pagal Nash-Sutcliffe modelio efektyvumo koeficientą E (Nash, Sutcliffe, 1970). Vienas iš svarbiausių Nash-Sutcliffe koeficiento privalumų yra lengvai interpretuojamos jo reikšmės. E koeficiento reikšmės kinta nuo $-\infty$ iki 1. Jei modelio efektyvumo koeficientas E mažesnis už nulį, tai stebėjimų vidurkis yra informatyvesnis nei naudojamas modelis. Idealiai modelio rezultatai atitinka matavimo rezultatus tada, kai modelio efektyvumo koeficientas $E = 1$, tačiau laikoma, kad modelis pakankamai tiksliai imituoja tiriamąją sistemą, kai Nash-Sutcliffe koeficientas yra didesnis nei 0,5.

Nash-Sutcliffe koeficientas tiksliai apibūdina bendrą modelio atitikimą, tačiau šiame darbe siekiama įvertinti, kokios yra TM modelio stipriosios ir silpnosios pusės ir kokius hidrologinio režimo rodiklius modelis apibūdina patikimiausiai. Dėl šios priežasties naudoti dar du papildomi tinkamumo rodikliai: vidutinė klaida ΔR ir koreliacijos koeficientas r . Vidutinė klaida ΔR parodo, kiek vidutiniškai per laiko žingsnį sumodeliuotas nuotėkis buvo didesnis ar mažesnis už išmatuotą nuotėkį, tačiau neteikia informacijos apie nuotėkio sezoninės ar daugiametės kaitos atitikimą. Koreliacijos koeficientas r naudotas nustatant modeliuoto ir išmatuoto nuotėkio fazių sutapimą. Aukšta koreliacijos koeficiento vertė rodo, kad TM modelis tiksliai atspindi potvynių ir nuoslūgių laiką, tačiau sumodeliuoto nuotėkio dydis gali labai skirtis nuo išmatuoto.

Modelio įvesties duomenys – 1971–2000 m. mėnesio kritulių kiekio suma ir vidutinė mėnesio oro temperatūra, to pačio laikotarpio vidutiniai mėnesio debitai, tirtųjų baseinų nuotėkį geriausiai reprezentuojančiose vandens matavimo stovyse, imti iš Lietuvos hidrometeorologijos tarnybos archyvo. Kritulių ir temperatūros duomenys, reprezentuojantys konkretų baseiną, apskaičiuoti kaip geografiškai baseinui artimų stočių vidurkis.

MODELIO JAUTRUMO TYRIMAS

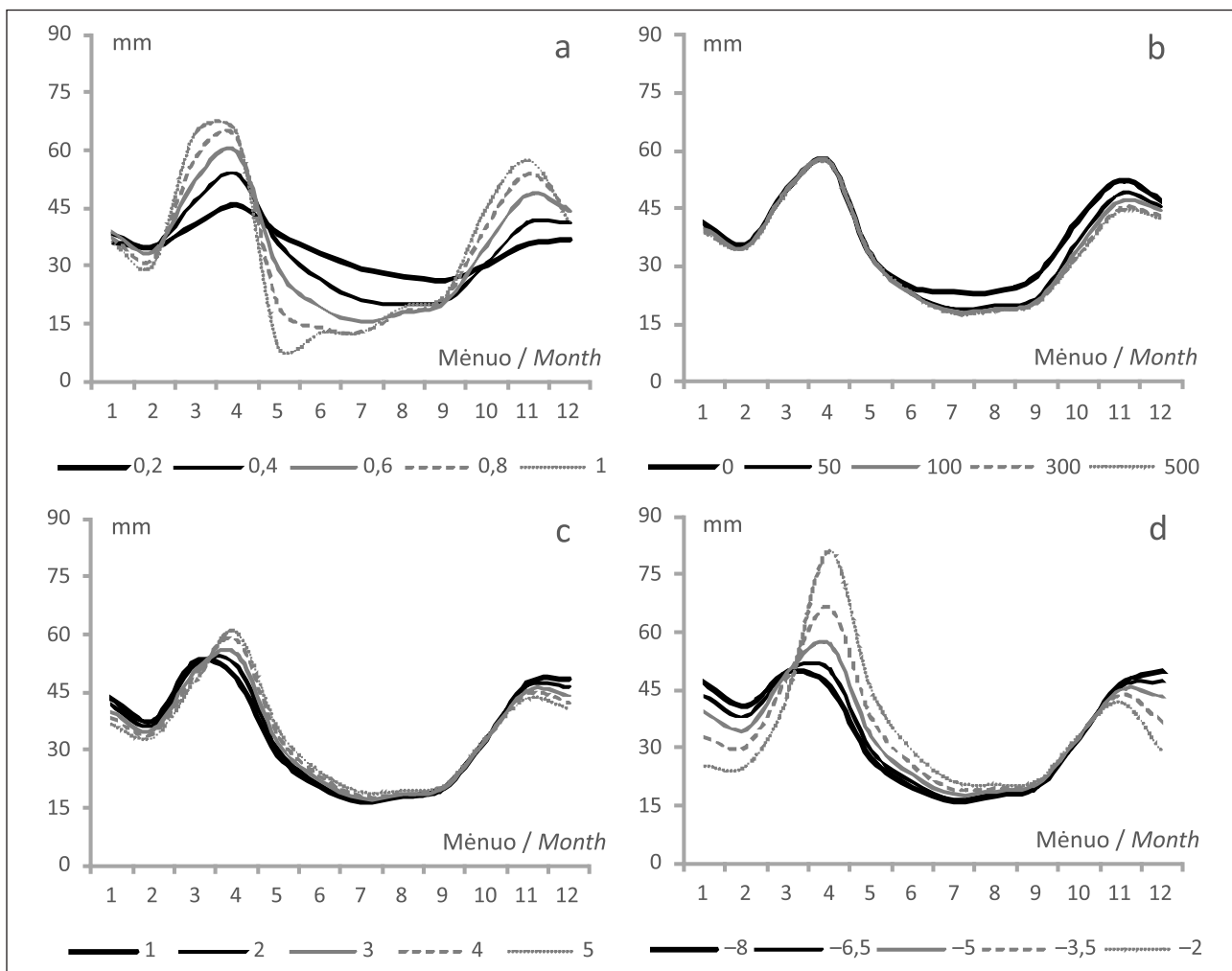
Prieš taikant modelį konkrečiai sistemai patogiau išsiaiškinti, kaip skirtingi parametrai keičia modelio rezultatus, ir įvertinti, kokių parametrų pokyčiams modelio rezultatai yra jautriausi. Žinant, kaip kintant parametro vertėms keičiasi modelio rezultatai, galima geriau suvokti pačią modeliu imituojamos

sistemos struktūrą bei tikslingai ieškoti optimalių, tiriamąją sistemą geriausiai atspindinčių modelio parametrų verčių.

Vertinant modelio rezultatų jautrumą parametrų pokyčiams buvo atliekamas nuotėkio skaičiavimas TM modeliu keičiant vieno parametro vertes, kitus parametrus prilyginus galimų šių parametrų reikšmių intervalo vidurkiui. Modelio rezultatų jautrumas parametrų pokyčiams labiausiai yra nulemtas pačios modelio struktūros, todėl poveikio kryptis visuose tiriamuosiuose baseinuose buvo vienoda, o skyrėsi tik poveikio dydis. Iliustruojant modelio parametrų poveikį apskaičiuotam nuotėkiui pateikti atlikti Jūros upės skaičiavimai (3 pav.).

Jautriausiai TM modeliu skaičiuojamas nuotėkis reaguoja į rezervuaro koeficiento f kaitą. Mažos f koeficiento vertės lemia vandens užsilaikymą baseine, todėl metinė nuotėkio kaita yra labai maža (3a pav.). Didėjant rezervuaro koeficientui didesnė dalis vandens atsargų, sukauptų baseine, gali nutekėti per konkretų laiko žingsnį, todėl šio koeficiento kaita labiausiai veikia sezoninio nuotėkio amplitudę. Kai rezervuaro koeficientas pasiekia 1, vanduo baseine nesikaupia.

Maksimalios dirvos drėgmės talpos S_{max} poveikis TM modeliu apskaičiuotam nuotėkiui labiausiai pasireiškia antroje metų pusėje (3b pav.). Maksimalios dirvos drėgmės talpos parametras TM modelyje leidžia įvertinti konkretaus mėnesio



3 pav. TM modeliu apskaičiuoto Jūros upės nuotėkio (mm) priklausomybė nuo parametrų verčių (a – rezervuaro koeficientas f); b – maksimali dirvos drėgmės talpa S_{max} (mm); c – oro temperatūros riba T_L (°C) aukščiau kurios iškritę krituliai yra lietus; d – oro temperatūros riba T_s (°C) žemiau kurios visi iškritę krituliai yra sniegas)

Fig. 3. Jūra River runoff calculated with different parameter values (a – reservoir coefficient f); b – maximum soil moisture content S_{max} (mm); c – threshold temperature T_L (°C) above which all precipitation is liquid; d – threshold temperature T_s (°C) below which all precipitation is snow)

dirvos įsotinimą drėgme ir lemia, kokia dalis potencialios evapotranspiracijos realizuosis į išgaravusio vandens kiekį. Didinant S_{max} vertę, esant tam pačiam dirvos drėgmės kiekiui, mažėja dirvos įsotinimas drėgme ir garavimas, o apskaičiuotas nuotėkis turėtų didėti. Be garavimo, maksimalios dirvos drėgmės talpa TM modelyje naudojama apskaičiuoti dirvoje susidarantį vandens perteklių. Jei dirvos drėgmė viršija maksimalią talpą TM modelyje, laikoma, kad susidaręs drėgmės perteklius papildo baseino vandens atsargas, o didėjant baseino vandens atsargoms didėja ir nuotėkis. Dėl šios priežasties didinant S_{max} vertę mažesnis kiekis vandens papildo baseino vandens atsargas, todėl modeliu apskaičiuotas nuotėkis turėtų mažėti. Maksimalios dirvos drėgmės talpos S_{max} poveikis vertinant dvi skirtingas nuotėkio formavimosi stadijas yra priešingas. Didinant S_{max} mažėja garavimas iš dirvos paviršiaus, tačiau dirva gali būti greičiau prisotinama drėgme, todėl didėja baseino vandens atsargos. Ar didėjant S_{max} TM modeliu apskaičiuotas nuotėkis didės, ar mažės, priklauso nuo į tiriamąją sistemą iškrentančių kritulių ir potencialios evapotranspiracijos santykio. Lietuvos klimato sąlygomis didėjant maksimaliai dirvos drėgmės talpai S_{max} sumažėja nuotėkis nuo vasaros nuosėkio pradžios iki kitų metų pavasario potvynio pradžios (3b pav.).

Oro temperatūros riba T_L , aukščiau kurios iškritę krituliai yra lietus, ir oro temperatūros riba T_S , žemiau kurios visi iškritę krituliai yra sniegas, lemia, kiek iškritusių į baseiną kritulių bus sniego pavidalo ir kaip intensyviai tirps sniego danga. Jei T_S ir T_L parametru vertės padidinsime, tai TM modeliu skaičiuojant fazinę kritulių sudėtį net ir esant sąlyginai aukštai temperatūrai (tačiau mažesnei nei T_L) galės formuotis sniegas, todėl apskaičiuotas metinis sezono sniego kiekis bei sniego dangoje sukauptos vandens atsargos bus didesnės. TM modeliu apskaičiuotas nuotėkis jautresnis T_S parametro kaitai nei T_L (3c, d pav.), nes jei vidutinė mėnesio oro temperatūra yra mažesnė už T_S , tai visi per mėnesį iškritę krituliai bus sniego pavidalo, o T_L parametras lemia, kokią dalį iškritusių kritulių sudarys sniegas, jei vidutinė mėnesio oro temperatūra yra tarp T_S ir T_L .

Nuo T_S ir T_L parametru labiausiai priklauso šaltojo sezono modeliu apskaičiuotas nuotėkis, tačiau sniego dangos formavimasis ir tirpsmas

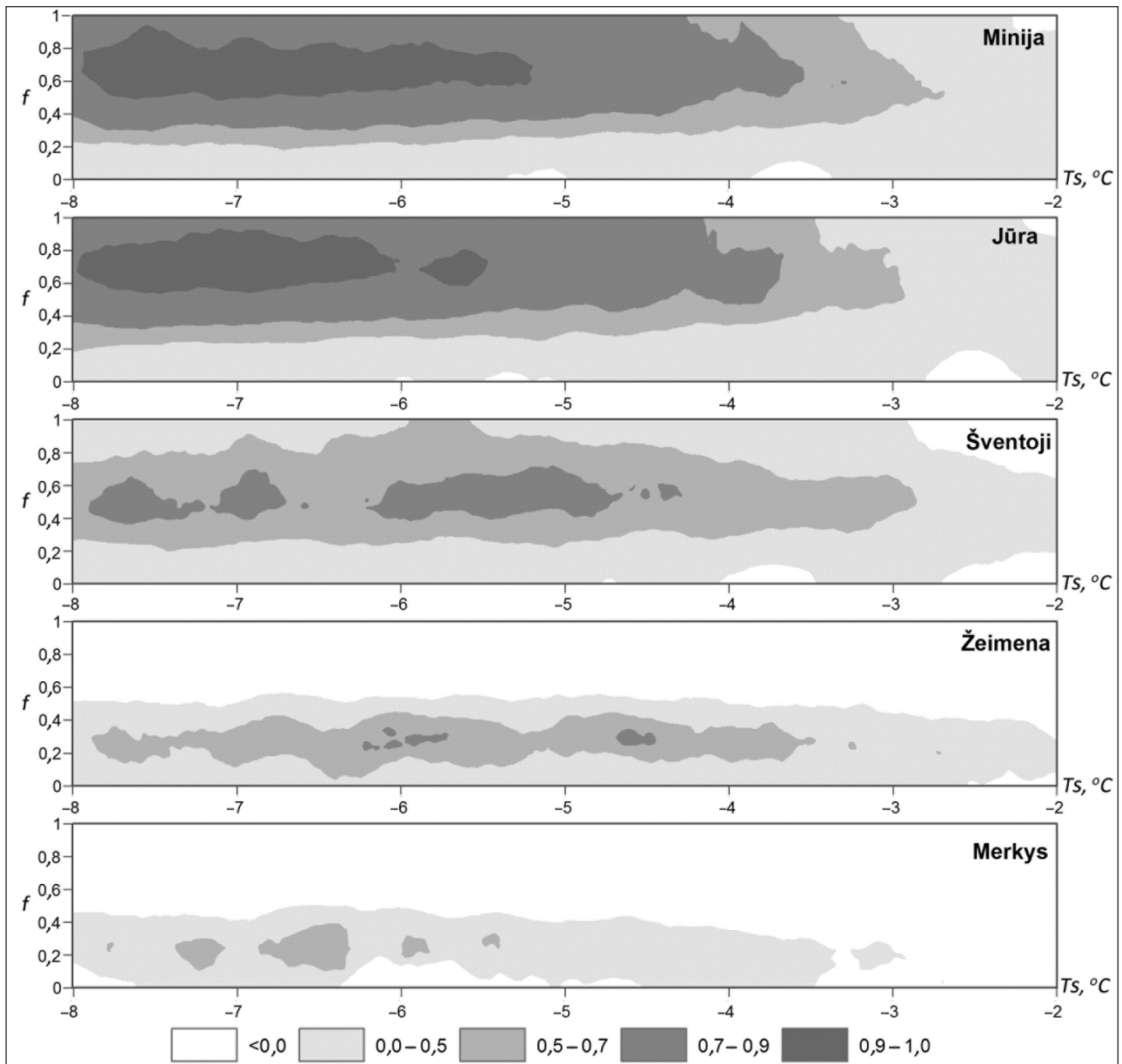
veikia baseino vandens atsargų sezoninį pasiskirstymą, todėl sniego dangos rodikliams įvertinti naudojamų parametru poveikis apskaičiuotam nuotėkiui stebimas ir kitais metų sezonais (3c, d pav.). Didinant T_S ir T_L baseine susikaupia daugiau sniego, todėl žiemos metu, kai iškritę krituliai kaupiasi sniego dangoje, nuotėkis sumažėja, o sniego tirpsmo metu nuotėkis labai padidėja. Sniego dangos susidarymą lemiantys parametrai veikia tik sezoninį nuotėkio pasiskirstymą, metinis nuotėkis nuo jų nepriklauso.

MODELIO KALIBRAVIMAS

TM modelio parametrai modelio rezultatus gali veikti priešingomis kryptimis (3 pav.), todėl skirtingi jų deriniai gali lemti tokį pat rezultatą. Bandydami modelį pritaikyti konkrečiam baseinui yra tikslinga išbandyti įvairius parametru derinius ir įvertinti, kaip su šiais parametru deriniais modelis geba imituoti procesus, vykstančius tiriamame baseine. Šiame darbe, ieškant kiekvieną upės baseiną geriausiai atspindinčių parametru verčių, Monte Karlo metodu buvo sugeneruota 1000 derinių iš kiekvieno parametro galimų reikšmių intervalo. Vėliau su šiais parametru deriniais skaičiuotas modelio ir matavimo rezultatų atitikimas. Modelio parametru derinių tinkamumas įvertinamas lyginant, kaip modelis geba atspindėti vidutinę daugiametę sezoninę nuotėkio kaitą.

Ieškant optimalių parametru verčių pirmiausia yra tikslinga įvertinti, kaip modelio rezultatų tikslumas priklauso nuo labiausiai jų kaitą lemiančių rezervuaro koeficiento (f) ir sniego susidarymo ribinės temperatūros (T_S) parametru (3 pav.).

Bendrą modelio ir matavimų rezultatų atitikimą gerai atspindi Nash-Sutcliffe modelio efektyvumo koeficientas E . Remiantis E koeficiento priklausomybe nuo rezervuaro koeficiento ir sniego susidarymo ribinės temperatūros, galima identifikuoti šių parametru verčių intervalus, kuriuose TM modelio rezultatai yra geriausi (4 pav.). TM modelio rezultatai jautriausiai reaguoja į rezervuaro koeficiento f pokyčius, todėl geriausi modelio rezultatai vertinant visų tirtųjų upių nuotėkį gauti naudojant sąlyginai siaurą f parametro verčių intervalą. Mažu natūraliu reguliavimu pasižyminčiose Vakarų Lietuvos upėse (Minijoje ir Jūroje) geriausi modelio rezultatai gauti, kai naudotos rezervuaro koeficiento reikšmės



4 pav. Nash-Sutcliffe modelio efektyvumo koeficiento E priklausomybė nuo skaičiavimams naudojamų rezervuaro koeficiento (f) ir sniego susidarymo ribinės temperatūros (T_s)

Fig. 4. Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient E dependence on reservoir coefficient (f) and snow formation threshold temperature (T_s)

kito nuo 0,5 iki 0,9. Didėjant upių baseinų natūraliam reguliavimui parametro f reikšmės, su kuriomis gaunami geriausi modelio rezultatai, mažėja. TM modeliu apskaičiuotas Šventosios upės nuotėkis artimiausias išmatuotam tada, kai naudojamo rezervuaro koeficientas kinta nuo 0,3 iki 0,8. Didžiausiu natūralaus reguliavimo koeficientu pasižyminčių Žeimenos ir Merkio upių nuotėkį TM modelis geriausiai atspindi su mažesnėmis nei 0,5 rezervuaro koeficiento vertėmis. Sniego susidarymo ribinė temperatūra (T_s) modelio rezultatų tinkamumą veikia mažiau, todėl

geri modelio rezultatai gaunami gana plačiame šio parametro verčių intervale – nuo -4 iki -8 °C.

Nustačius parametų f ir T_s sritis, kuriose modelio rezultatai geriausi, Monte Karlo metodu sugeneruoti nauji parametų deriniai naudojant identifikuotas parametų sričių ribas. Iš šių parametų derinių kiekvienai tirtajai upei atrinkta po 100 parametų derinių, leidžiančių modeliu apskaičiuoti nuotėkį, artimiausią matavimo rezultatams. Net ir šimte modelio parametų derinių, su kuriais gaunami geriausi modelio rezultatai, pastebima labai įvairių konkrečių parametų verčių.

Ypač platus mažiau modelio rezultatus veikiančių T_L ir S_{max} parametrų verčių intervalas. Pavyzdžiui, į 100 parametrų derinių, su kuriais TM modeliu apskaičiuotas nuotėkis labiausiai atitinka Šventosios upės nuotėkį, patenka S_{max} vertės nuo 140 iki 500 mm.

Identifikuoti pačias optimaliausias TM modelio parametrų reikšmes vertinant konkretaus baseino nuotėkį yra sudėtinga, nes keičiant modelio parametrus jo efektyvumo koeficientas E ir apskaičiuotas nuotėkis kinta labai mažai. Dėl šios priežasties vertinant, kaip TM modelis geba apskaičiuoti vidutinę daugiametę sezoninę nuotėkio kaitą, buvo remtasi ne tik vienu optimaliu parametrų deriniu (2 lentelė), bet ir atsižvelgta į neapibrėžtumą, atsirandantį identifikuojant optimalius parametrus. Neapibrėžtumo, kuris atsiranda nustatant parametrus, poveikis apskaičiuotam nuotėkiui atskleistas naudojant 100 geriausių parametrų derinių. Įvertintas kiekvieno iš šių derinių patenkančio parametro vidurkis \bar{x} ir standartinis nuokrypis s_x . Nuotėkio neapibrėžtumas, atsirandantis dėl parametrų neapibrėžtumo, vertinamas skaičiuojant nuotėkį su $\bar{x} \pm 2 \cdot s_x$ parametrų vertėmis (5 pav.).

Parametrų verčių neapibrėžtumas gali labai paveikti apskaičiuoto upių nuotėkio neapibrėžtumą. Net ir su geriausiais parametrų verčių deriniais apskaičiuotas mėnesio nuotėkis gali skirtis 20–25 mm. Didžiausias absoliutus neapibrėžtumo dydis yra pavasario potvynio laikotarpiu ir po jo einančioje nuotėkio slūgimo fazėje (5 pav.), tačiau lygindami neapibrėžtumo dydį su pačia nuotėkio verte gauname, kad didžiausia santykinė paklaida vertinant nuotėkį gali būti apskaičiuojama vertinant gegužės–rugsėjo mėn. nuotė-

kį. Upėse, su tolygiai per metus pasiskirsčiusiu nuotėkiu, santykinė paklaida didžiausia balandžio mėn. Didelės parametrų neapibrėžtumo paklaidos rodo, kad norint tiksliai įvertinti nuotėkį būtina surasti optimalias parametrų reikšmes. Jei tinkamumo rodikliai keičiant modelio parametrų vertes nebekinta, tikslinga atlikti TM modelio kalibravimą, remiantis modelio rezultatų jautrumo parametrų kaitai analize (3 pav.) ir vizualiniu modeliu apskaičiuotos bei pagal matavimo duomenis įvertintos vidutinės daugiametės nuotėkio kaitos palyginimu (5 pav.).

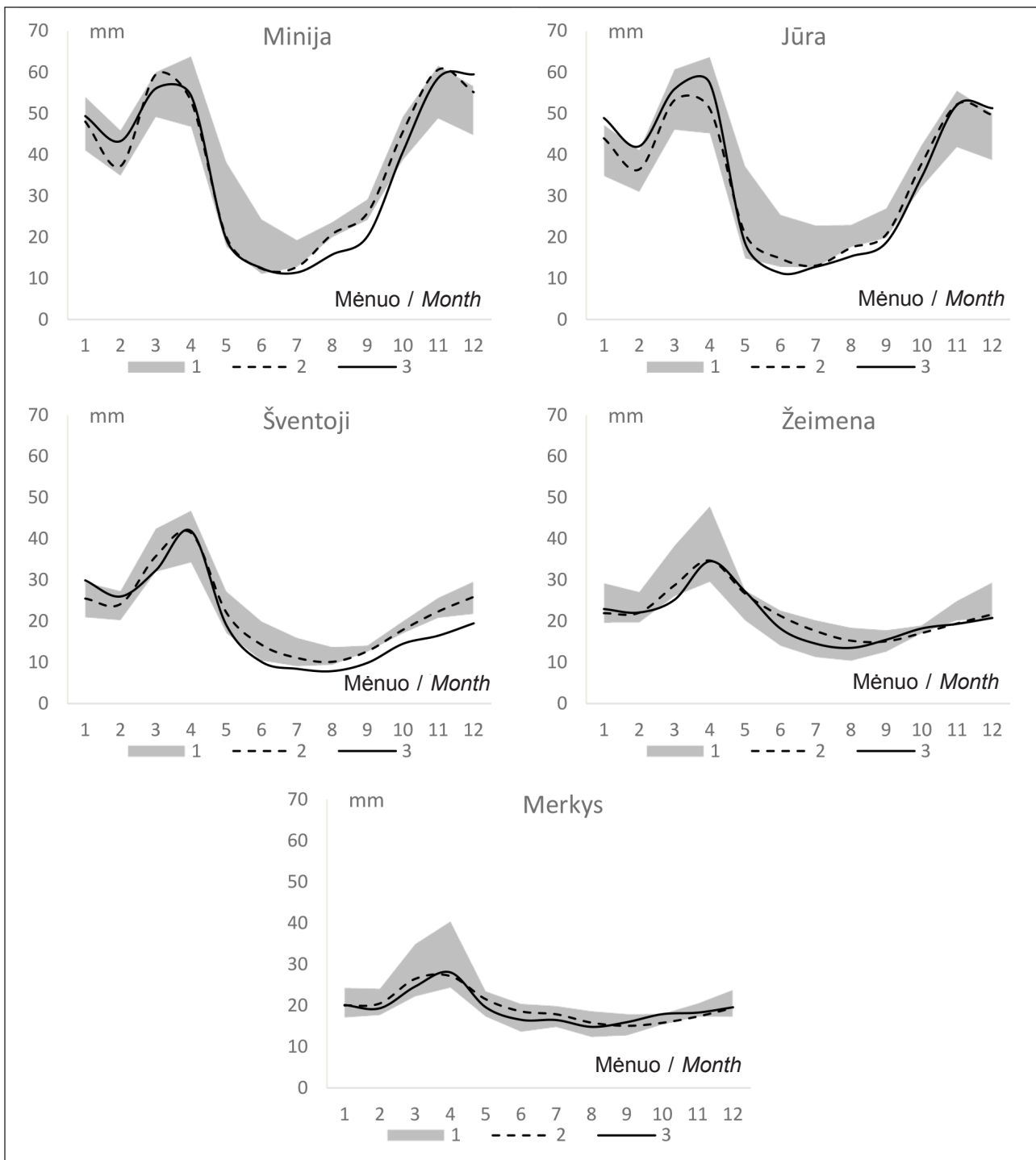
Vertinant vidutinę daugiametę nuotėkio sezoninę kaitą TM su optimaliais parametrais modelio rezultatai gerai atitinka matavimų duomenis (2 lentelė). Visoms tirtosioms upėms Nash-Sutcliffe modelio efektyvumo koeficientas E yra aukštesnis arba lygus 0,85. Koreliacijos koeficientas, atskleidžiantis, kaip tiksliai atspindimas nuotėkio fazių laikas, taip pat labai aukštas. Sumodeliuoto nuotėkio tūris labai nedaug skiriasi nuo išmatuoto. Didžiausias nuotėkio tūrio skirtumas tarp TM modelio ir matavimo duomenų apskaičiuotas Šventosios upėje. Modeliu apskaičiuotas Šventosios nuotėkis vidutiniškai 2,3 mm/mėn. didesnis, nei įvertintas pagal matavimų rezultatus (2 lentelė).

TM modeliu pakankamai tiksliai įvertinamas nuotėkis pavasario potvynio laikotarpiu, tačiau TM modeliu apskaičiuotas Minijos ir Jūros nuotėkis vasaros nuosėkio laikotarpiu bei Šventosios upės nuotėkis nuo birželio iki gruodžio yra didesnis, nei nustatytas pagal matavimo duomenis (5 pav.). Šio laikotarpio nuotėkis, apskaičiuotas TM modeliu, priklauso nuo maksimalių dirvos drėgmės atsargų S_{max} dydžio (3 pav.), tačiau net ir

2 lentelė. Optimalių TM modelio parametrų ir modelio tinkamumo rodiklių vertės, apskaičiuotos vertinant modelio gebėjimą atspindėti vidutinę daugiametę sezoninę nuotėkio kaitą

Table 2. Optimal TM model parameters for simulation of mean seasonal distribution of runoff and indicators of model fit

Upė River	Modelio parametrai Model parameters				Modelio tinkamumo rodikliai Indicators of model fit		
	f	$T_s, ^\circ\text{C}$	$T_L, ^\circ\text{C}$	S_{max}, mm	r	$\Delta R, \text{mm/mėn.}$	E
Minija	0,72	-5,0	1,7	500	0,98	0,7	0,96
Jūra	0,72	-7,2	4,4	350	0,99	-0,6	0,96
Šventoji	0,56	-7,0	5,9	410	0,96	2,3	0,87
Žeimenė	0,29	-6,5	6,2	410	0,96	0,8	0,90
Merkys	0,25	-6,9	2,8	460	0,93	0,4	0,85



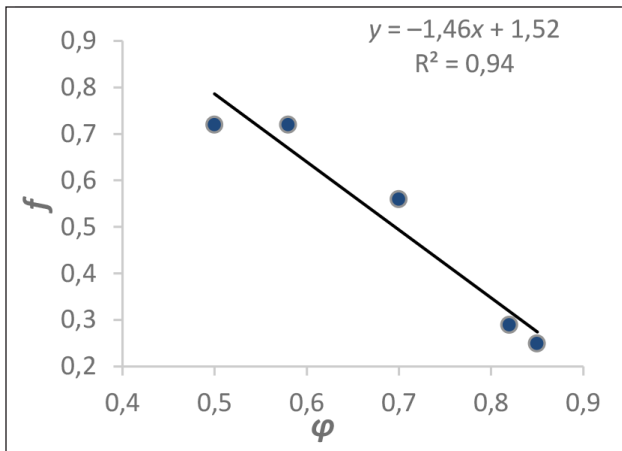
5 pav. Vidutinės daugiamečių nuotėkio sezoninės kaitos, apskaičiuotos TM modeliu, neapibrėžtumas (1), nuotėkis nustatytas TM modeliu su optimaliomis parametru reikšmėmis (2) ir įvertintas pagal matavimų duomenis (3)

Fig. 5. Uncertainty of mean seasonal distribution of runoff calculated with TM model (1), runoff calculated with optimal parameter values (2) and calculated from measurement data (3)

labai padidinus šio parametro reikšmę apskaičiuotas nuotėkis išlieka didesnis nei išmatuotas.

Optimali rezervuaro koeficiento f vertė kiekviename iš tirtųjų baseinų gerai koreliuoja su natūralaus nuotėkio reguliavimo koeficientu φ ($r = 0,98$) (6 pav.). Apskaičiavus φ koeficiento vertę iš turi-

mų nuotėkio stebėjimų duomenų galima įvertinti tiriamajam baseinui tinkamą f vertę. TM modeliu apskaičiuotas nuotėkis jautriausiai reaguoja į rezervuaro koeficiento f kaitą, tad žinant jo vertę labai palengvėtų modelio pritaikymas pasirinktos upės baseinui.

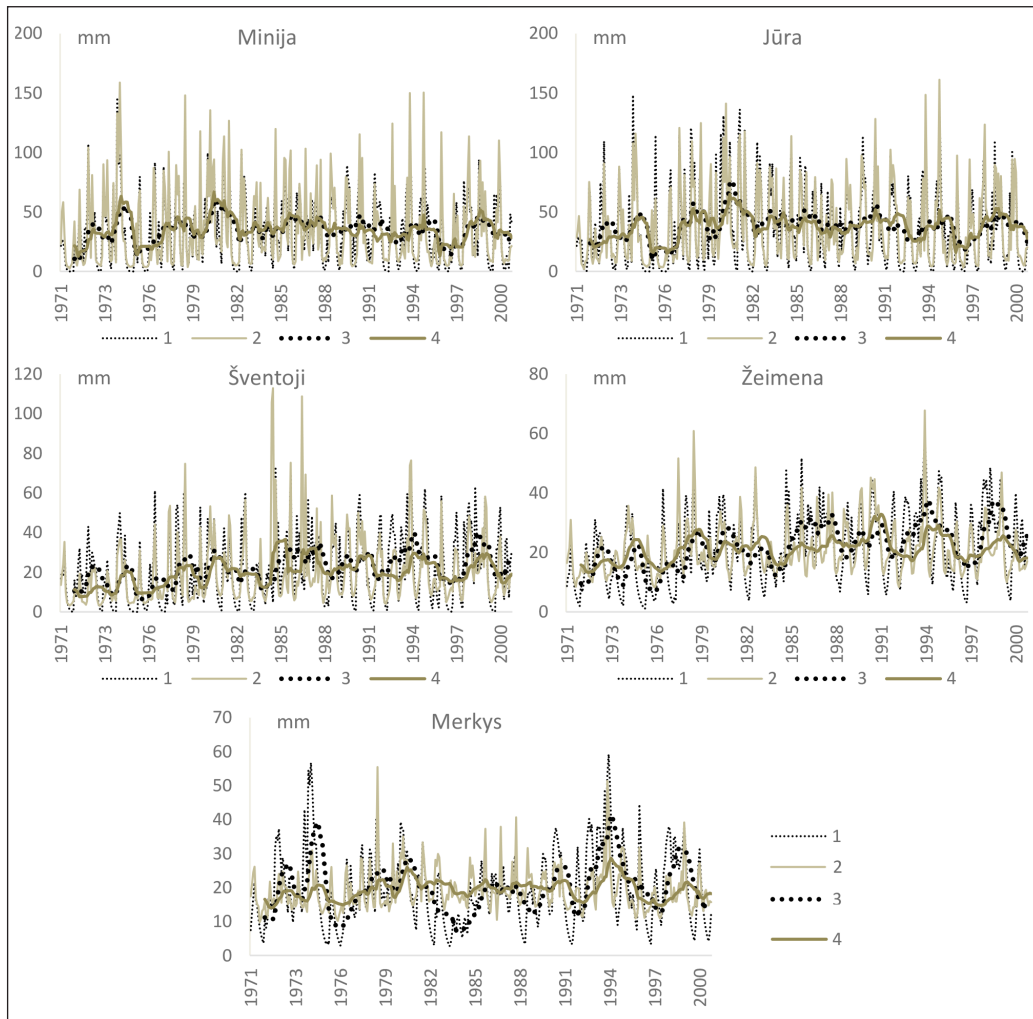


6 pav. Rezervuaro koeficiento f priklausomybė nuo natūralaus nuotėkio reguliavimo koeficiento φ

Fig. 6. Regression between natural runoff regulation coefficient φ and reservoir coefficient f

MODELIO VALIDAVIMAS

TM modelis sugeba gerai atkartoti vidutinę daugiametę tirtųjų upių nuotėkio kaitą. Vertinant modelio tinkamumą remiantis vidutiniais duomenimis, teigiami ir neigiami nuokrypiai panaikina vieni kitus. Norint įsitikinti, ar modelis tinkamai atspindi procesus, vykstančius tiriamuose baseinuose, vertinta, kaip tiksliai apskaičiuojamas kiekvieno 1971–2000 m. mėnesio nuotėkis (7 pav.). Visose tiriamosiose upėse TM modeliu apskaičiuoti didelių potvynių pikai ir minimalus nuotėkis vasaros nuosėkio laikotarpiu dažniausiai yra mažesni nei įvertinti pagal matavimo rezultatus. Modeliu įvertintas ir apskaičiuotas iš stebėjimų duomenų metinis nuotėkis kai kuriais metais gali skirtis. Visose



7 pav. TM modeliu apskaičiuoto (1) ir išmatuoto (2) vidutinio mėnesio nuotėkis 1971–2000 m. bei slankieji 12 mėnesių modeliuoto (3) ir išmatuoto (4) nuotėkio vidurkiaiai

Fig. 7. Modeled with TM (1) and measured (2) monthly runoff in 1971–2000 and 12 month moving averages of modeled (3) and measured (4) runoff

tiriamosiose upėse, išskyrus Miniją, modelių apskaičiuotas nuotėkio tūris yra didesnis nei išmatuotas. Konkrečių metų nuotėkį TM modelis gerai įvertina Minijoje ir Jūroje. Daugiau nei du trečdalius metų šiose upėse modelių apskaičiuotas metinis nuotėkio tūris nuo išmatuoto skyrėsi mažiau nei 10 %. Šventosios upėje mažiau nei 10 % skyrėsi tik 14 metų nuotėkis. Net 7 metus metinis nuotėkis apskaičiuotas modelių buvo didesnis daugiau nei 30 % už stebėtą nuotėkį. Žeimenoje ir Merkyje metinio nuotėkio skirtumai pasiskirstę nuo 0 iki 50 %, tačiau mažesni nei 10 % nuokrypia pasitaiko tik 9 metus Žeimenoje ir 11 metų Merkyje.

Daugiametį nuotėkio ciklus TM modelis gerai atspindi Minijoje ir Jūroje. Šių upių modelių ir iš matavimų duomenų apskaičiuoto nuotėkio 12 mėnesių slankieji vidurkiai beveik sutampa (7 pav.). Silpniau modelis įvertina Šventosios daugiametį nuotėkio ciklus, o Žeimenoje ir Merkyje daugiametiniai nuotėkio ciklai TM modelių atspindėti prastai.

3 lentelė. Nash-Sutcliffe modelio efektyvumo koeficientas E , apskaičiuotas konkrečioms metų mėnesiams. Pilka spalva pažymėtuose langeliuose E neigiamas, didesnis už 0,5 E koeficiento vertės pateiktos paryškintu šriftu

Table 3. Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient calculated for a specific month of the year. In gray cells E is negative, values greater than 0.5 are presented in bold

Mėnuo Month	Minija	Jūra	Šventoji	Žeimena	Merkys
1	0,73	0,70	-0,19	-0,05	-0,96
2	0,82	0,59	-0,12	-0,08	-1,74
3	0,71	0,56	0,60	0,14	0,21
4	0,39	0,41	0,54	0,35	-0,01
5	-0,01	-0,02	-0,09	0,17	-3,91
6	-1,73	-3,31	-2,89	-1,64	-4,12
7	-2,04	0,50	-3,64	-8,12	-4,42
8	-1,71	0,22	-5,23	-6,06	-6,12
9	0,42	0,55	-4,84	-3,18	-4,24
10	0,76	0,76	-0,33	-0,71	-4,29
11	0,82	0,77	-0,73	-0,66	-4,50
12	0,71	0,57	-0,25	-0,59	-3,38

TM modelis tiksliai atspindi nuotėkio fazių kaitą Minijoje ($r = 0,86$) ir Jūroje ($r = 0,88$). Šventosios nuotėkio kaitos fazės atspindimos blogiau ($r = 0,75$). Blogiausiai 1971–2000 m. mėnesių

nuotėkio kaitą TM modelis atspindi Žeimenoje ($r = 0,61$) ir Merkyje ($r = 0,52$). Vidutinei daugiametei sezoninei nuotėkio kaitai tiriamuose upės baseinuose pritaikytas TM modelis tik Minijoje ($E = 0,6$) ir Jūroje ($E = 0,8$) efektyviai atspindi 1971–2000 m. nuotėkio kaitą. Vertinant Šventosios nuotėkį Nash-Sutcliffe modelio efektyvumo koeficientas E lygus 0,3, vadinasi, modelio efektyvumas yra mažas. Žeimenos ir Merkyje daugiametį nuotėkio kaitos TM modelis su parametrais, optimaliais vertinti sezoninę nuotėkio kaitą, neatspindi ($E < 0$). Bendras modelio efektyvumo koeficientas apskaičiuotas iš visų 1971–2000 m. duomenų neatspindi, kuriuo metų laiku jis yra efektyviausias. Kiekvienam metų mėnesiui iš 30 metų duomenų apskaičiuotas Nash-Sutcliffe modelio efektyvumo koeficientas E rodo, kad TM modelis sukalibruotas atspindėti sezoninę nuotėkį efektyviai vertina ($E > 0,5$) daugiametę spalio–kovo laikotarpio nuotėkio kaitą Minijoje ir Jūroje (3 lentelė). Šventosios upėje modelis tinkamai apibūdina tik kovo ir balandžio mėn. daugiametę nuotėkio kaitą, o Žeimenoje ir Merkyje visais metų mėnesiais TM modelis blogai atspindi daugiametę nuotėkio kaitą. Daugumą mėnesių Šventosios, Žeimenos ir Merkyje Nash-Sutcliffe modelio efektyvumo koeficientas E neigiamas, todėl šiais mėnesiais vidutinis nuotėkis yra informatyvesnis nei TM modelis su pasirinktais parametrais.

IŠVADOS

Jautriausiai TM modelių apskaičiuotas nuotėkis reaguoja į rezervuaro koeficiento f ir ribinės sniego susidarymo temperatūros T_s kaitą. Į likusių dviejų parametru – maksimalios dirvos drėgmės talpos S_{max} ir ribinės sniego tirpsmą nusakančios temperatūros T_L – kaitą apskaičiuotas nuotėkis reaguoja mažiau, todėl taikant TM modelį konkrečiai upei svarbiausia tiksliai nustatyti optimalias f ir T_s parametru vertes.

TM modelių apskaičiuotą nuotėkį, veikiantį rezervuaro koeficientą f , galima įvertinti pagal glaudų ryšį ($r = 0,98$) su tiriamosios upės natūralaus nuotėkio reguliavimo koeficientu φ , kuris apskaičiuojamas iš ilgalaikių kasdienių upės debitų duomenų.

TM modelis su kiekvienam upės baseinui pasirinktu optimaliu parametru deriniu gerai atspindi vidutinę daugiametę sezoninę nuotėkio kaitą, ypač

tiksliai atspindima potvynio fazė. Vertinant visų tirtųjų upių nuotėkio sezoninį pasiskirstymą TM modelio efektyvumo koeficientas E buvo didesnis nei 0,84, o apskaičiuotas nuotėkis vidutiniškai skyrėsi mažiau nei 2,3 mm per mėnesį.

Su vidutinę daugiametę sezoninę nuotėkio kaitą geriausiai apibūdinančiais TM modelio parametrais apskaičiuotas 1971–2000 m. konkrečių mėnesių nuotėkis geriausiai atspindimas Jūros ir Minijos upėse. Modeliu apskaičiuotas šių upių metinis nuotėkis dažniausiai skiriasi nuo išmatuoto mažiau nei 10 %, o daugiametė nuotėkio kaita atspindima labai tiksliai. Modelio efektyvumas yra mažas vertinant Minijos ir Jūros nuotėkį gegužės–spalio mėn. Šventosios nuotėkį TM modelis su pasirinktais parametrais efektyviai atspindi ($E > 0,5$) tik gegužės ir balandžio mėn., o vertinant Žeimenos ir Merkio nuotėkį TM modelio efektyvumas yra mažas ($E < 0,5$).

TM modelis gerai atspindi vidutinę daugiametę sezoninę kaitą visuose tiriamuosiuose baseinuose, tačiau konkrečių mėnesių nuotėkis tiksliai įvertintas tik upėse su mažai natūraliai sureguliuotu nuotėkiu.

Gauta 2016 08 18
Priimta 2016 10 10

LITERATŪRA

1. Arnall N. W. 1992. Factors controlling the effects of climate change on river flow regimes in a humid temperate environment. *Journal of Hydrology*. 132: 321–342.
2. Boorman D. B., Sefton C. E. M. 1997. Recognising the uncertainty in the quantification of the effects of climate change on hydrological response. *Climate Change*. 35: 415–434.
3. Gleick P. H. 1986. Methods for evaluating the regional hydrologic impacts of global climatic change. *Journal of hydrology*. 88: 97–116.
4. Gleick P. H. 1987. The development and testing of a water balance model for climate impact assessment: modeling the Sacramento Basin. *Water Resources Research*. 23: 1049–1061.
5. Jiang T., Chen Y. D., Xu C.-Y., Chen X. H., Chen X., Singh V. P. 2007. Comparison of hydrological impacts of climate change simulated by six hydrological models in the Dongjiang Basin, South China. *Journal of Hydrology*. 336: 316–333.
6. Kay A. L., Davies H. N., Bell V. A., Jones R. G. 2009. Comparison of uncertainty sources for climate change impacts: flood frequency in England. *Climate Change*. 92: 41–63.
7. Kilkus K., Štaras A., Rimkus E., Valiuškevičius G. 2006. Changes in water balance structure of Lithuanian rivers under different climate change scenarios. *Aplinkos tyrimai, inžinerija ir vadyba*. 2(36): 3–10.
8. Kilkus K., Stonevičius E. 2011. *Lietuvos vandenų geografija*. Vilnius: Vilniaus universitetas.
9. Kriauciuniene J., Jakimavicius D., Sarauskiene D., Kaliatka T. 2013. Estimation of uncertainty sources in the projections of Lithuanian river runoff. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 27: 769–784.
10. McCabe G. J., Ayers M. 1989. Hydrologic effects of climate change in the Delaware River basin. *Water Resources Bulletin*. 25: 1231–1242.
11. McCabe G. J., Markstrom S. L. 2007. *A Monthly Water-Balance Dodel Driven by a Graphical Interface*. U.S Geological Survey Open-File Report. 2007–1088. 6 p.
12. Metropolis N., Ulam S. 1949. The Monte Carlo method. *Journal of the American Statistical Association*. 44(247): 335–341.
13. Najafi M. R., Moradkhani H., Jung I. W. 2011. Assessing the uncertainties of hydrologic model selection in climate change impact studies. *Hydrological Processes*. 25: 2814–2826.
14. Nash J. E., Sutcliffe J. V. 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part I. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*. 10(3): 282–290.
15. Ohmura A. 2001. Physical basis for the temperature-based melt index method. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 40: 753–761.
16. Poulin A., Brisette F., Leconte R., Arsenault R., Malo J. S. 2011. Uncertainty of hydrological modelling in climate change impact studies in a Canadian, snow dominated river basin. *Journal of Hydrology*. 409 (3–4): 626–636.
17. Prudhomme C., Davies H. 2009a. Assessing uncertainties in climate change impact analyses on the river flow regimes in the UK. Part 1: baseline climate. *Climate Change*. 93: 177–195.
18. Prudhomme C., Davies H. 2009b. Assessing uncertainties in climate change impact analyses on the river flow regimes in the UK. Part 2: future climate. *Climate Change*. 93: 197–222.
19. Rimkus E., Korneev V., Pakhomau A., Stonevičius E. 2012. *Climate Change in the Nemunas River Basin: Observed Trends and Future Predictions*. UNECE projekto ataskaita. <https://www2.unece.org>.
20. Stonevičius E., Štaras A., Valiuškevičius G. 2008. Dirvožemio drėgmės režimo pokyčių XXI a. prognozės pagal skirtingus klimato kaitos scenarijus. *Geografija*. 44(1): 17–25.
21. Stonevičius E. 2008. *Klimato kaitos poveikio ne-stratifikuoto ežero vandens balansui ir eutrofikacijai tyrimas (Žuvinto ežero pavyzdžiu)*: daktaro disertacija. Vilniaus universitetas.

22. Stonevičius E. 2009. Thornthwaite-Mather vandens balanso modelio optimizavimas Monte Karlo metodu. *Geografija*. 45(1): 54–61.
23. Thornthwaite C. W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*. 38(1): 55–94.
24. Thornthwaite C. W., Mather J. R. 1955. The water balance. *Publication in Climatology*. 8(1): 1–104.
25. Wang W., Shao Q., Yang T., Peng S., Xing W., Sun F., Luo Y. 2013. Quantitative assessment of the impact of climate variability and human activities on runoff changes: a case study in four catchments of the Haihe River basin, China. *Hydrological Processes*. 27: 1158–1174.
26. Xu C. Y., Singh V. P. 1998. Review on monthly water balance models for water resources investigations. *Water Resources Management*. 12: 31–50.

Edvinas Stonevičius, Dovydas Reitelaitis

APPLICATION OF THORNTHWAITE-MATHER WATER BALANCE MODEL TO LITHUANIAN RIVERS

S u m m a r y

The monthly water balance models are usually applied to catchments where the availability of meteorological and hydrological data is limited or there is not enough information to describe the catchment in more advanced models. In this study the Thornthwaite-Mather

water balance model is applied to five medium-sized Lithuanian rivers with different water supply composition and runoff seasonality. The main scope of the study is to evaluate the model ability to represent the runoff formation in catchments with different properties and to identify the strengths and weaknesses of the monthly water balance model.

The model sensitivity analysis was performed to identify the parameters who mostly affect the calculated runoff. The Monte Carlo optimization was used to determine the optimal Thornthwaite-Mather parameters set for each analyzed catchment. The mean seasonal runoff distribution is well represented by the model with the optimal parameters. The model results best fit the measured runoff during winter and spring flood. While the representation of the summer and autumn runoff formation is not as accurate. The multiannual runoff dynamics is better represented by the model in rivers with large runoff seasonality and where rain water substantially contributes to the total runoff. In such rivers the model is sufficiently effective to simulate the October–April runoff. The model with the selected parameter values is not capable to represent the multiannual runoff dynamics in rivers with low runoff seasonality due to the model ineffectiveness during the most months of the year.

Keywords: runoff, modeling, Thornthwaite-Mather model, sensitivity analysis, Monte Carlo optimization