



Получена: 15.01.2023 г.

Приета: 03.02.2023 г.

## ХИДРОЛОЖКИ ВОДОБАЛАНСОВ МОДЕЛ ЗА СИМУЛИРАНЕ НА ЕСТЕСТВЕНИЯ ОТТОК НА РЕКИТЕ В БЪЛГАРИЯ

Е. Артинян<sup>1</sup>, П. Царев<sup>2</sup>

*Ключови думи:* хидроложко моделиране, LSM SURFEX, RAPID routing

### РЕЗЮМЕ

Възможността за събиране, трансформация, съхранение и обработка на значителни масиви от данни за околната среда, заедно с наличните изчислителни системи и модели, предоставиха възможност за разработване и устойчиво използване на физични водобалансови модели за симулиране на оттока на реките в България. Приложенията на тези модели в областта на хидрологичното прогнозиране, изследванията на водния баланс и в научно-изследователския процес в Националния институт по метеорология и хидрология (НИМХ) са с над 15-годишна история. В доклада се разглеждат основните варианти на такива системи в НИМХ, като са дадени конкретни случаи на приложение в следните направления: симулиране и прогнозиране на оттока; изчисление на месечния и годишния воден баланс. Представени са приложения на свързани физичен модел за земната повърхност (ISBA, SURFEX) и концептуален модел за маршрутизиране на оттока в речната мрежа (Modcou, TOPMODEL, RAPID).

### 1. Въведение

През 70-те години на миналия век възниква необходимостта и възможността от включване в глобалните модели на атмосферна циркулация на системи на взаимодействие със земната повърхност. Математическото моделиране и компютърното симулиране е добре развит научен отрасъл, който успешно се използва в съвременната

---

<sup>1</sup> Ерам Артинян, доц. д-р инж., НИМХ – филиал Пловдив, бул. „Руски“ № 139, 4000 Пловдив, e-mail: [eram.artinian@meteo.bg](mailto:eram.artinian@meteo.bg)

<sup>2</sup> Петко Царев, инж., НИМХ – филиал Пловдив, бул. „Руски“ № 139, 4000 Пловдив, e-mail: [petko.tsarev@meteo.bg](mailto:petko.tsarev@meteo.bg)

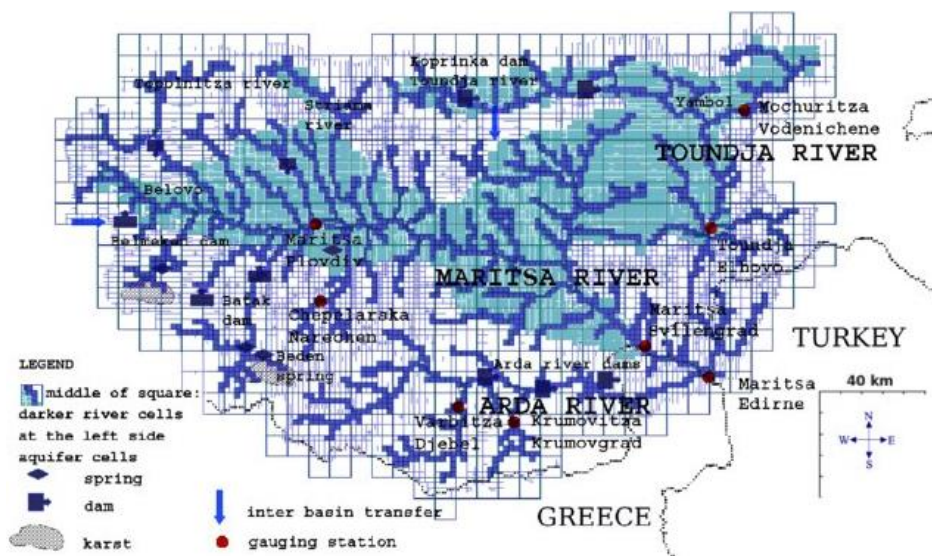
хидрология. Натрупаният опит позволява създаване на модели на обекти, представляващи интерес в много научни и стопански дейности и често тези модели се оказват изключително полезни.

Стремежът за подобряване на точността на хидроложките прогнози винаги остава актуален. Поради тази причина днес те се изготвят с помощта на оперативни прогностични системи, базирани на хидродинамични модели на атмосферата. В атмосферните модели е особено важно точното описание на процесите, възникващи на границата между атмосферата и земната повърхност с участието на почвата и растителната покривка. С помощта на различни параметризационни схеми се пресмятат радиационният обмен и потоците топлина и влага между атмосферата и земната повърхност.

## 2. Необходими елементи за реализацията на хидроложки водобалансов модел (XBM) за големи речни басейни в България – Land Surface Model (LSM) и хидроложки модел

Водобалансовите схеми в рамките на моделите за симулиране на процесите между атмосферата и земята изчисляват чрез 1D модел компонентите на оттока в  $\text{mm}/\text{m}^2$ : повърхностен и вътрепочвен отток, една част от който в последствие постъпва в подземните води (в ненаситената зона и в по-редки случаи във водонаситената зона).

Така наречените LSM осигуряват на атмосферните модели вертикалните потоци влага и енергия между атмосфера и земя. Повърхностният отток, евапотранспирацията и инфилтрацията от единица площ [ $\text{mm}/\text{m}^2$ ], се изчисляват от LSM като 1D модел и заедно с изменението на двата резервоара – почвена влажност и снежна покривка – балансират сумата на валежа. С течение на времето LSM стават все по-сложни, като в параметризацията на физичните процеси се включват динамична растителност, антропогенно въздействие (напояване), дифузно разпространение на влагата в дълбочина на почвата, параметризиране на цикъла на въглерода и включване на странични потоци влага и топлина към 1D модела.



Фиг. 1. Схема на хидроложки модел MODCOU в басейна на р. Марица

Към LSM, включително за проверка на изчисления отток от единица площ, се включват различни варианти на хидроложки модели, които концентрират оттока през речната мрежа. На фиг. 1 е изобразена речната мрежа на хидроложкия модел MODCOU [1] в басейна на р. Марица с резолюция 1 km, въведена в употреба през 2006 г. Втори по време заедно с LSM SURFEX в НИМХ е внедрен вариант на хидроложкия модел TOPMODEL [2, 3]. С добри резултати през последната година се въвежда маршрутизиране на оттока в речната мрежа с използване на хидроложкия модел Routing Application for Parallel computation of Discharge (RAPID) [4].

Хидроложкият модел (2D) преобразува оттока в обеми [m<sup>3</sup>/s] към определени точки [5].

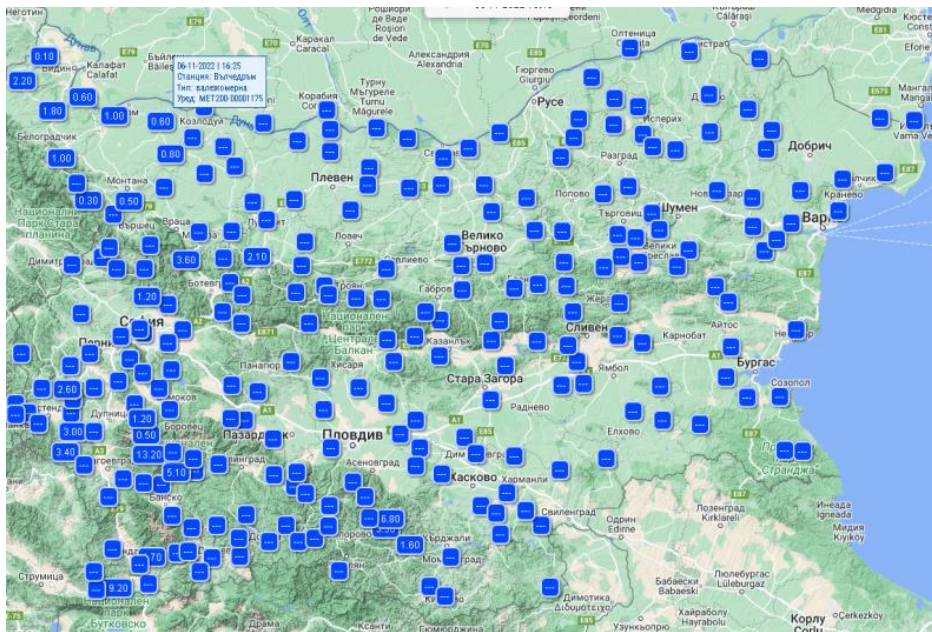
## 2.1. Динамични входни данни

За входни данни на схемата за изчисление на повърхностния отток на единица площ (LSM) се ползват данни от измервания на:

- валеж – сняг и дъжд;
- температура и влажност на въздуха;
- скорост и посока на вятъра;
- променливи за изчисление на радиационния баланс.

Променливите се произвеждат във вид на пространствени полета с хоризонтална резолюция 8×8 km или 4×4 km на база на измерванията от мрежата на НИМХ или произведени от проекта на EUMETSAT LSA-SAF [6, 7].

По-високата резолюция 4×4 km при изчисление на баланса изисква повече изчислителни ресурси без задължително да води до по-високо качество на симулациите на оттока поради липса на съгъдени наблюдения за валежите.



Фиг. 2. Мрежа от валежмерни станции на НИМХ

При системите, които включват хидрологична прогноза, входните данни от изброените динамични променливи, включително до самия час на автоматизираното изчисление, се получават от метеорологични измервания, най-вече от автоматични станции, и изчисленото състояние на диагностичните променливи на воднобалансовия модел (влажност в почвата, натрупана снежна покривка, воден обем в речните сегменти) се използва за инициализация на модела в началото на периода за изчисление на прогнозата. За периода на прогнозата данните за динамичните променливи се получават от метеорологични прогностични модели. В България се използват данните от метеорологични прогнозни модели с висока пространствена резолюция ALADIN-BG и AROME, както и данни от Европейския център за средносрочни прогнози – ECMWF.

На фиг. 2 е показана мрежата на валежомерните станции на НИМХ. Приблизително една валежомерна станция се пада средно на 370 km<sup>2</sup>. За подобряване на резолюцията за паднал на земната повърхност валеж ще се разчита да са налични данни от метеорологични радари.

## **2.2. Статични входни данни**

Като статични данни в ХВМ се залагат цифрови карти на релефа и речната мрежа, карти с хидравлични свойства на почвата и карти на сезонната еволюция на параметрите на растителната покривка. Пространствената резолюция на тези данни по принцип зависи от наличните в световен мащаб данни. Към този момент за LSM-SURFEX са използвани данни за растителността от ECOCLIMAP-SG [8] с резолюция 300 m и данни за почвите от Европейски център за данни за почвите – ESDAC [9], а за хидроложкия модел rapid данни за речна мрежа с резолюция около 80 m от HydroBASINS [10].

## **3. Сфери на приложение на ХВМ в управлението на водите**

- Водобалансови изчисления на естествения отток.
- Изчисление на естествения отток в неизмервани поречия.
- Аналитични изследвания на ефекта от климатичните промени във валежите и температурата на въздуха.
- Хидрологична прогноза на естествения отток с включване на прогноза за преливане на основни водохранилища.
- Начални условия на хидравлични (прогнозни) модели, изчисление на оттока във входни точки към основното русло.

## **4. Етапи на развитие на ХВМ в рамките на Националния Институт по Метеорология и Хидрология**

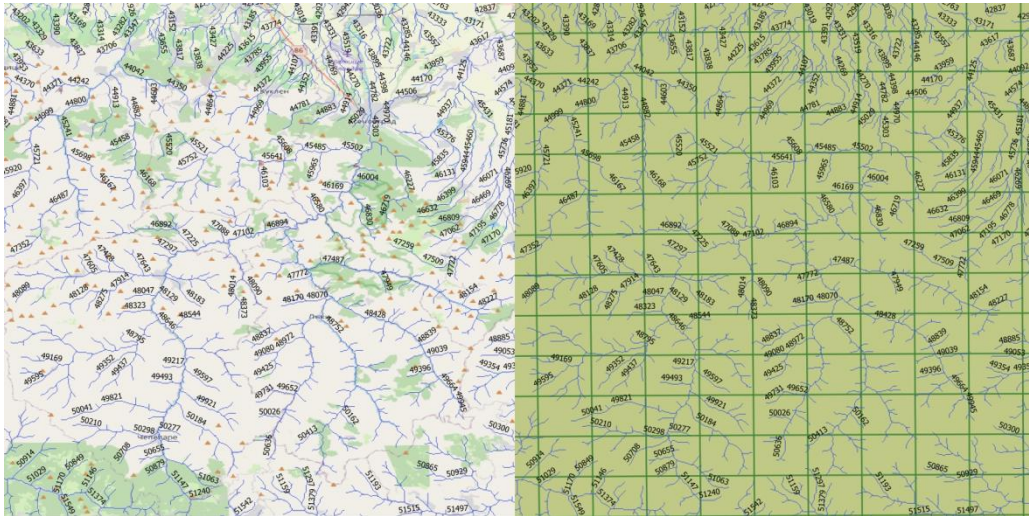
LSM SURFEX е създаден на базата на ISBA (Interface Soil Biosphere Atmosphere), като освен ISBA съдържа модули за симулиране на интерфейси към атмосферата за градска среда, море и езеро. Modcou съдържа и хидрогеоложки модел.

През 2006 г. е въведен ISBA – Modcou [5], който покрива басейните на Марица, Арда и Тунджа до границите на България. Моделът е с пространствена резолюция 8×8 km за LSM – ISBA и 1 km за хидроложкия модел Modcou. Времовата стъпка на входните данни и резултатите е през 3 ч.

През 2012 г. е въведен LSM – SURFEX [11] и хидроложки модел TOPMODEL [2]. Пространствената резолюция на SURFEX е 8 km, а тази на хидроложкия модел е 100 m. SURFEX-TOP е приложен за поречия Арда, Горна-Тунджа (над Ямбол) и през 2019 г. за дунавските водосборни басейни на реките Осъм, Вит, Огоста, Янтра, Искър.

През 2021 г. усвояването на технологията на хидроложки модел за маршрутизиране на оттока RAPID [12] позволява да се приложи последната версия на LSM SURFEX с дифузно разпространение на влагата в почвата [13] и по-детайлната база данни с параметри на растителността ECOCLIMAP-SG (SG за „second generation“) с резолюция 300 m. В сравнение с по-ранните приложения съществено подобрене е възможността за мулти-процесорни изчисления. Достигнатите подобрения на съществуващите модели са в следствие на:

- пространствена резолюция на LSM 4×4 km;
- стъпка на входните данни и резултатите – 1 ч.;
- дифузно разпространение на влагата в почвата;
- цифрови карти и БД за растителността ECOCLIMAP-SG;
- цифрови карти на свойствата на почвите ESDAC;
- мулти-процесорно изчисление.



**Фиг. 3. Речна мрежа и речни сегменти, използвани от RAPID с картна основа [14] (вляво) и пространствена мрежа от клетки на LSM SURFEX (4×4 km)**

Съчетаването на LSM с хидроложкия модел RAPID изисква калибрирането на два параметъра на Мъскингъм [4] и 4 параметъра на под-схемата за ненаситената подземна зона [5] за всеки под-водосбор. За да се постигнат добри резултати е необходимо да се разполага със серия от данни за измерен отток към устието на изследвания участък, включително периоди с високи и ниски води. Тъй като параметрите не зависят от площта на под-водосбора, определяне на параметрите на участъци от реки със силно нарушен отток може да се направи, като се ползват аналогични участъци с ненарушен отток и налични измервания и подобни физико-географски характеристики – релеф и геология. При всички случаи симулирането и прогнозирането на оттока при нарушен режим може да бъде успешно само при отчитане на влиянието на нарушителите: водовземанията и ретензията в резервоарите – язовири и езера. Клетките на LSM за басейна на р. Марица са 2464,

а под-басейните и речните участъци са 27878 (фиг. 3). При тази конфигурация средният размер на площта на под-водосборите е 1,3 km<sup>2</sup>, което, при наличие на данни за калибриране на моделните параметри, позволява детайлно симулиране на оттока, включително на относително малки под-басейни.

## **5. Използване на ХВМ при разработване на системи за автоматизирано изчисление на хидрологична прогноза, публикувани в интернет**

Хидроложките водобалансови модели в НИМХ са в основата на автоматизирани системи за изчисление на хидрологична прогноза както следва:

- 2007 г.: прогноза три дни напред, със стъпка 3 ч., на притока [m<sup>3</sup>/s] в язовирите на НЕК в Родопите с участието на метеорологична прогноза;
- 2009 г.: система за ранно предупреждение за водосборите на Марица и Тунджа. Системата ISBA-Modcou се използва за изчисление на прогнозни начални условия (дебит [m<sup>3</sup>/s] на р. Тунджа при с. Баня, обл. Сливен и на р. Мочурица) за хидравличния модел Mike 11 за река Тунджа;
- 2013 г.: система за ранно предупреждение за наводнение ARDAFORECAST [9] с включена прогноза за преливане на язовирите с прогноза и от ECMWF;
- 2015 г.: система за ранно предупреждение за наводнение във водосбора на Горна Тунджа (над Ямбол) с включена прогноза за преливане на язовирите;
- 2020 г.: проект FLOODGUARD – BG-GR под ръководството на ГД-ПБЗН представлява подобрене на съществуващите досега системи.

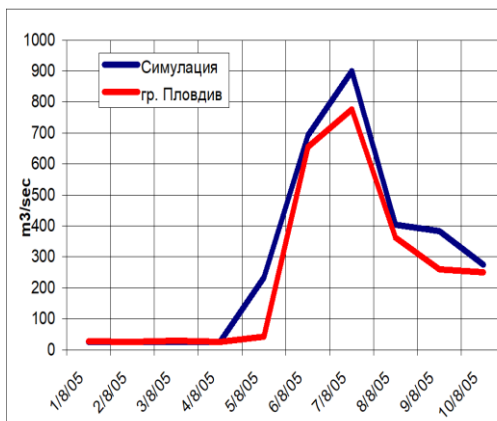
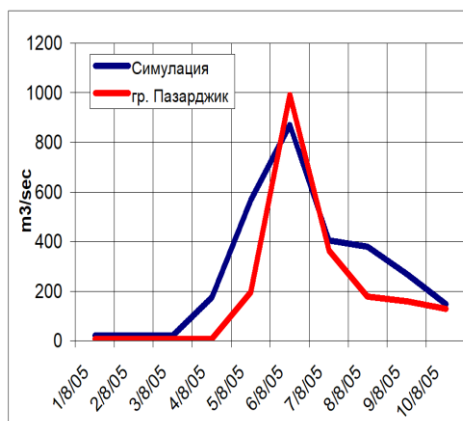
## **6. Използване на ХВМ за числено симулиране на конкретни събития**

На фиг. 4 са изобразени симулирани и измерени водни количества в периода 4 – 6 август 2005 г., след т.нар. „Ихтимански циклон“. При това екстремно хидрометеорологично събитие язовир Тополница прелива и намиращите се под него селища по течението на р. Тополница и частично на р. Марица са силно засегнати. Симулациите със системата ISBA-Modcou с използване на данни от преливането на яз. Тополница съответстват в голяма степен на измерванията.

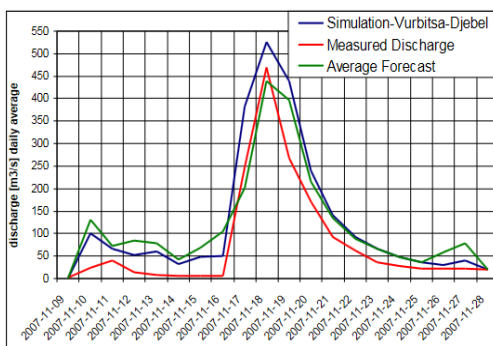
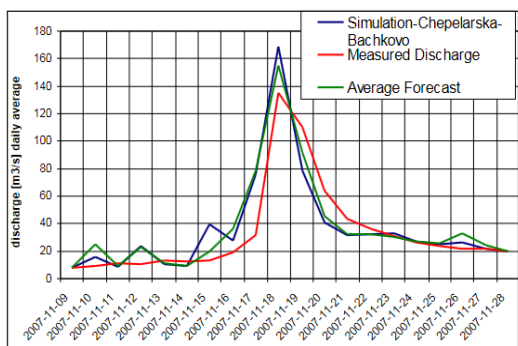
На фиг. 5 са изобразени прогнозираните, симулираните и измерените водни количества за родопските реки Чепеларска и Върбица в периода 16 – 20 ноември 2007 г. През този период в Родопите е измерен валеж от 100 до 200 mm. Симулираният отток (синьо) за р. Чепеларска (с. Бачково) и Върбица при спирка Джебел е близък до измерения от хидрометричните станции (червено).

От 10 до 12 декември 2021 в басейните на р. Арда и р. Върбица падат валежи над 150 до 200 mm. Причинени са значителни щети, като е разрушен и отнесен железен пешеходен мост до с. Китница заедно с две автоматични хидрологични станции. Симулацията на оттока на р. Арда при с. Китница показва максимум от 1596 m<sup>3</sup>/s, което е близко до хидравлично изчисления максимален отток – 1530 m<sup>3</sup>/s [15].

В началото на септември 2022-а в горното течение на р. Стряма падат сумарни валежи над 200 mm. Симулацията на оттока със SURFEX-RAPID (фиг. 6) и измервания на място показват за створа на реката при гр. Баня (ХМС 72520) преминаването на висока вълна с обезпеченост под 1 % и повтораемост около 1 път на 400 години.

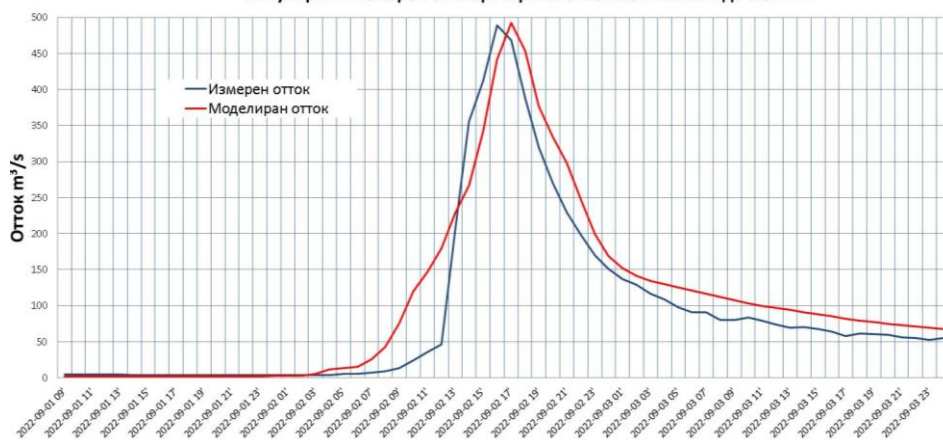


**Фиг. 4. Симулирано и измерено водно количество в периода 4 – 6 август 2005 г. за р. Марица при Пазарджик и Пловдив**



**Фиг. 5. Прогнозирани, симулирани и измерени водни количества в периода 16 – 20 ноември 2007 г. за р. Чепеларска при Бачково и р. Върбица при сп. Джебел**

**Симулиран и измерен отток р. Стряма с. Баня от 1.9.2022 до 3.9.2022**



**Фиг. 6. Симулирани със SURFEX-RAPID (червено) и измерени от автоматична станция (синьо) водни количества със стъпка 1 час за периода 1 – 3 септември 2022 г. на р. Стряма гр. Баня (ХМС 72320) – висока вълна с обезпеченост около 1 път на 400 г.**

## 7. Заключение

Хидроложките водобалансови модели, независимо от относителната сложност на използване, свързана с необходимостта от голям обем данни, представляват ценен инструмент за хидрологични анализи и прогнози. ХВМ се използват в НИМХ, заедно с метеорологичните прогнозни модели, като основа на автоматизирани системи за изчисление на хидрологична прогноза, свързани с обществено достъпни интернет информационни сайтове: <http://arda.hydro.bg> и частично в изчисленията на прогнозата в <http://maritsa.meteo.bg>, както и за ежедневно информационно обслужване на Министерството на околната среда и водите (МОСВ), Главна дирекция „Пожарна безопасност и защита на населението“ (ГДПБЗН), областни и общински администрации и обществеността. ХВМ са подходящи за използване при нужда от анализ на параметрите на оттока за райони с липсващи измервания или за изчисление на естествения отток за водосборни басейни със силно нарушен отток. Използването на ХВМ за изчисление на водния баланс обаче изисква високо качество при пространственото определяне на падналите валежи от дъжд и сняг и достоверно пресъздаване на динамиката на изменение на температурата на въздуха. В България измерването на първия от тези компоненти ще достигне нова фаза след въвеждането в употреба на метеорологични радари, каквито във всички европейски страни се използват в системите за свръх-краткосрочна (nowcasting) хидрологична прогноза и предупреждения за внезапни наводнения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Gomez, E. et al.* Distributed surface-groundwater coupled model applied to climate or long term water management impacts at basin scale. // *European Water* 1/2: 3 – 8, 2003. E.W. Publications, 2003.
2. *Vincendon, B. et al.* Advantages of coupling the ISBA land surface model with a TOPMODEL hydrological model dedicated to Mediterranean flash floods. // *Hydrology*, 394 (1 – 2), 256 – 266, doi: 10.1016/j.jhydrol.2010.04.012, 2010.
3. *Artinyan, E. et al.* Flood forecasting and alert system for Arda River basin. // *Hydrology*, 541, 457 – 470. 10.1016/j.jhydrol.2016.02.059, 2016.
4. *David, C. et al.* Regional-scale river flow modeling using off-the-shelf runoff products, thousands of mapped rivers and hundreds of stream flow gauges. // *Environmental Modelling & Software*, 42, 116 – 132, 2013.
5. *Artinyan, E. et al.* Modelling the water budget and the riverflows of the Maritsa basin in Bulgaria. // *Hydrology and Earth System Sciences*. 12. 10.5194/hessd-4-475-2007, 2008.
6. *Trigo, I. et al.* The Satellite Application Facility on Land Surface Analysis. // *Int. J. Remote Sens.*, 32, 2725-2744, doi: 10.1080/01431161003743199, 2011.
7. *Carrer, D. et al.* Satellite Retrieval of Downwelling Shortwave Surface Flux and Diffuse Fraction under All Sky Conditions in the Framework of the LSA SAF Program (Part 1: Methodology). // *Remote Sensing*, 11(21), 2532, (2019a).
8. CNRM. Wiki – ECOCLIMAP-SG – CNRM, <https://opensource.umr-cnrm.fr/projects/ecoclimap-sg/wiki> (n.d.), poseten na 14-01-2023.
9. *Panagos, P. et al.* European Soil Data Centre: Response to European policy support and public data requirements; *Land Use Policy*. 29 (2), 329 – 338, doi:10.1016/j.landusepol.2011.07.003, 2012.
10. *Lehner, B. et al.* New global hydrography derived from spaceborne elevation data. *Eos, Transactions. AGU*, 89(10): 93 – 94, 2008.

11. *Le Moigne, P. et al.* The Latest Improvements in SURFEX v8.0 of the Safran-Isba-Modcou Hydrometeorological Model over France, 10.5194/gmd-2020-31, 2020.
12. *David, C. et al.* River Network Routing on the NHDPlus Dataset. // Hydrometeorology, 12, 5, 913 – 934, Oct. 2011.
13. *Decharme, B. et al.* Local evaluation of the Interaction between Soil Biosphere Atmosphere soil multilayer diffusion scheme using four pedotransfer functions. // Geophys. Res., 116, D20126, doi:10.1029/2011JD016002, 2011.
14. QuickOSM. <https://plugins.qgis.org/plugins/QuickOSM/>, poseten na 15.01.2023.
15. *Paralska, K. et al.* Analysis of high wave during hydrological extreme event on 10 – 15 December 2021 with significant rainfall in south Bulgaria. 22nd International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2022, <https://doi.org/10.5593/sgem2022/3.1/s12.04>.

## **HYDROLOGICAL WATER BALANCE MODEL FOR MODELLING THE NATURAL RIVER FLOW OF RIVERS IN BULGARIA**

**E. Artinyan<sup>1</sup>, P. Tsarev<sup>2</sup>**

***Keywords:*** hydrological modelling, LSM SURFEX, RAPID routing

### **ABSTRACT**

The ability to collect, transform, store, and process significant arrays of environmental data, together with the available computing systems and models, provided the opportunity to develop and sustainably use physical water balance models for simulating river runoff in Bulgaria. The applications of these models in the field of hydrological forecasting, water balance studies, climate change, as well as in the research process at the National Institute of Meteorology and Hydrology (NIMH) have over 15 years of history. The paper examines the variants of such systems used by NIMH, giving specific application cases: river flow forecasting, computation of water balance, simulation of extreme hydrological events. Some results of linking a physical deterministic model for the land surface (ISBA, SURFEX) and a conceptual model for runoff routing in the river network (Modcou, TOPMODEL, RAPID) are presented.

---

<sup>1</sup> Eram Artinyan, Assoc. Prof. Dr. Eng., NIMH – branch Plovdiv, 139 Ruski blv, 4000 Plovdiv, e-mail: [eram.artinian@meteo.bg](mailto:eram.artinian@meteo.bg)

<sup>2</sup> Petko Tsarev, Eng., NIMH – branch Plovdiv, 139 Ruski blv, 4000 Plovdiv, e-mail: [petko.tsarev@meteo.bg](mailto:petko.tsarev@meteo.bg)