



## Hydrological modeling of the streamflow in the Osam River watershed

Silviya Stoyanova\*

*National of Institute of Meteorology and Hydrology,  
66 Tsarigradsko shosse, blvd, 1784 Sofia, Bulgaria*

**Abstract:** In this study, the results of the development and performance of an innovative approach for studying the hydrological processes in the watershed of the Osam River in Bulgaria via the application of the Soil and Water Assessment Tool are presented. Being a physically-based, semi-distributed numerical model, SWAT is capable of providing a detailed representation of the elements of the hydrological cycle. The model was adapted for application over the Osam River watershed using measured hydrometeorological daily time series data for the period 2015–2022. SWAT model parameters were derived from a digital elevation model, land cover and soil maps. SWAT was calibrated using measured daily streamflow data from all five hydrometric stations in the watershed. A sensitivity analysis towards daily discharge records was also performed. Two quantitative statistics were used to assess the goodness of calibration and validation of the model: the Nash–Sutcliffe efficiency coefficient (NSE) and the percent bias (PBIAS). Calibration statistics showed very good results for daily streamflow simulations for mid and downstream Osam River and good results for the upstream Osam watershed. The validation of the model for simulations on a daily time step showed very good results. The calibrated SWAT model was further applied for streamflow forecasting in Osam River watershed.

**Keywords:** Hydrological modelling, SWAT, streamflow forecasting

---

\* silviya.stoyanova@meteo.bg

Силвия Стоянова

# Хидрологично моделиране на речния отток във водосбора на р. Осъм

Силвия Стоянова

*Национален Институт по Метеорология и Хидрология,  
София, бул. „Цариградско шосе“ 66*

**Резюме:** В настоящата публикация са представени резултатите от изследването на хидрологичните процеси във водосбора на р. Осъм с използването на физически базирания полуразпределен хидроложки модел SWAT (Soil and Water Assessment Tool). Моделът е адаптиран за приложение за водосбора на р. Осъм, като е използвана хидрометеорологична информация за осемгодишен период (2015 г. – 2022 г.) със стъпка по време 24-часа. Поради физическия характер на SWAT, параметрите на модела са определени на база цифров модел на терена, карта на земното покритие и почвена карта. След анализ на резултатите от симулациите с първоначално приетите, физически базирани параметри, моделът е калибриран с данни за измерени водни количества към всички пет хидрометрични станции във водосбора на р. Осъм. В процеса на калибриране е изследвана и чувствителността на параметрите, използвани за калибрирането на модела. За оценка на работата на модела с калибрирани параметри са използвани два основни статистически критерия: коефициент на ефективност на Наш-Сътклиф (NSE) и процентно отклонение (PBIAS). За периода на калибриране статистическите оценки на модела с 24-часова стъпка са много добри за средната и долната части на водосбора и добри за планинската част. За избраните периоди на валидиране статистическите оценки на модела с 24-часова стъпка са много добри. Калибрираният хидроложки модел е приложен за прогнозиране на речния отток във водосбора на р. Осъм.

**Ключови думи:** хидрологично моделиране, SWAT, прогнозиране на речния отток

## 1. ВЪВЕДЕНИЕ

В световната практика хидрологичните модели са най-използваното средство за изследване на хидрологичните процеси във водосборните басейни. С тяхна помощ е възможно количествено да бъдат определени основните елементи на водния баланс - повърхностен отток, инфилтрация, изпарение и подхранване на подземните водоносни хоризонти. Това ги поставя в основата на различни планове и стратегии за управление на водните ресурси. Познаването на механизмите на формиране на речния отток, пространственото и времевото разпределение на водата в рамките на даден водосбор е ключово за справяне с

редица предизвикателства: екстремни хидрологични събития като засушавания и наводнения, нарушаване на хидрологичния цикъл.

Опитът на български учени и експерти в областта на хидроложкото моделиране включва използването на различни видове модели, посредством които е изследван хидрологичния отговор на метеорологичните условия във водосборите на част от големите реки в страната. В Дунавския басейн, част от който е водосборът на р. Осъм, са използвани напълно разпределния физически базиран модел TOPKAPI (TOPographic Kinematic APproximation and Integration) за водосбора на р. Огоста (Yordanova et al., 2017), изкуствени невронни мрежи за водосбора на р. Искър (Балабанова, 2011), полуразпределния физически базиран модел SWAT (Soil and Water Assessment Tool) за водосбора на р. Вит (Stoyanova, 2021), полуразпределния физически базиран модел HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System) за водосбора на р. Янтра (Bojilova, 2011), NAM модулет „валеж-отток“ на MIKE+Rivers by DHI (Danish Hydraulic Institute) за водосбора на р. Русенски Лом (Кошинчанов, 2017).

Целта на представеното изследване е да оцени и затвърди приложимостта на полуразпределния хидроложки модел SWAT (Soil and Water Assessment Tool) за прогнозиране на речния отток. SWAT е използван за симулиране на хидрологичните процеси във водосбора на река Осъм, като са определени параметрите, които оказват най-голямо влияние върху хидроложкия режим. Моделът е калибриран наред с провеждане на анализ на чувствителността на модела към различните параметри и изменението на стойностите им. След валидирането му, моделът е приложен за прогнозиране на речния отток във водосбора на р. Осъм.

Изборът на водосбора на река Осъм за провеждане на хидрологичното изследване е в съответствие с идентифицираните в актуалните Планове за управление на речните басейни (ПУРБ) и Предварителна оценка на риска от наводнения (ПОРН) предизвикателства, свързани с количеството и режима на водите. Съгласно ПОРН, в поречието на р. Осъм са идентифицирани зони със значителен потенциален риск от наводнения, засягащи населени места, земеделски земи и инфраструктура. От друга страна, ПУРБ поставя акцент върху устойчивото използване и опазване на водните ресурси, включително осигуряването на достатъчни водни количества за различните видове водоползване при запазване на екологичното състояние на водните тела.

Водосборът на р. Осъм е обект на водоползване за питейно-битови, селскостопански и екологични нужди, което обуславя необходимостта от задълбочено изследване на процесите на формиране на речния отток.

## **2. ОПИСАНИЕ НА ИЗСЛЕДВАНИЯ ВОДОСБОР**

Водосборната област на р. Осъм е ограничена на запад от вододела с р. Вит, а на изток от вододелите на притоците на р. Янтра - реките Росица и Студена. В областта на поречие Осъм се включват части от Стара планина, Предбалкана и

Дунавската равнина. Река Осъм се образува от сливането на Черни и Бели Осъм, като за начало е приета р. Черни Осъм, която води началото си от западната част на Троянския балкан. Река Осъм се влива в Дунав при с. Черковна (Генерални схеми, 2000).

Дължината на р. Осъм е 314 км, а площта на водосборната ѝ област - 2824 км<sup>2</sup>. Средният наклон на реката е 5.7‰. Водосборната област е тясна, със средна ширина под 20 км, а гъстотата на речната мрежа е 0,4 км/км<sup>2</sup> като най-малка е гъстотата на речната мрежа при р. Мечка – 0,15 км/км<sup>2</sup> (фигура 1).



**Фиг.1.** Обща информация за водосбора на р. Осъм  
**Fig.1.** General information about the Osam River watershed

Във водосбора на р. Осъм годишната сума\* на валежите варира от 537 mm до 972 mm в ниско разположените части на водосбора, до 949 mm в по-високите и планинските райони. Максималните стойности са в периода май - юли: 73 mm÷92 mm в Дунавската равнина и 98 mm÷154 mm в Предбалкана и планинските части на водосбора. Минималните стойности в равнинната част от водосбора са през август - 26÷31 mm, а в по-високите и планинските райони в периода ноември-януари - 50÷58 mm. Валежната сума закономерно намалява от южната планинска част на север, като валежите през студената половина на годината съставят близо 40% от годишната сума.

\*Данните са за периода 2015 г. – 2022 г.

Първата снежна покривка във високите части на водосбора се образува още през ноември, а в по-ниските райони - през декември. Във високопланинските райони на височина над 1500 – 1700 m снежната покривка се задържа до края на април. Броят на дните със снежна покривка във водосбора е най-голям през

януари – 15-17 дни в припланинската и равнинната части от водосбора и 31 дни във високоразположените райони (Nikolov et al., 2019).

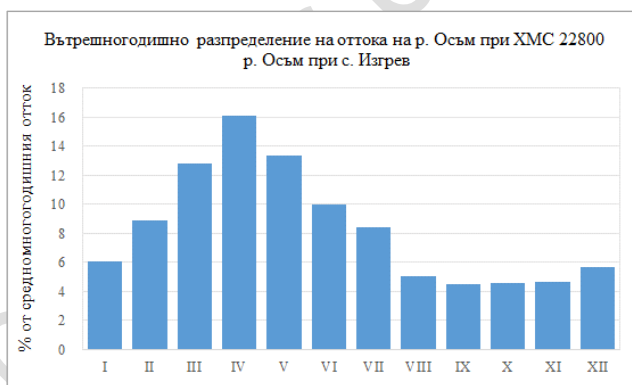
Във водосбора на р. Осъм най-студен\* е месец януари с температури от  $-4.7\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $-2.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а най-топъл\* месец е август с температури от  $29.4\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $32.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

\*Данните са за периода 2015 г. – 2022 г.

За периода 1991 – 2020 г. средногодишният отток на р. Осъм по данни от хидрологичните станции се изменя в границите от  $6.130\text{ m}^3/\text{s}$  ( $193.3 \times 10^6\text{ m}^3$ ) при гр. Троян до  $11.260\text{ m}^3/\text{s}$  ( $355.1 \times 10^6\text{ m}^3$ ) при с. Изгрев.

Вътрешногодишното разпределение на оттока в поречието на р. Осъм е обусловено от сезонните изменения на оттокообразуващите фактори, характерни за умерено – континенталния климатичен райони, в който попада водосборния басейн на р. Осъм. Типичното за този тип климат е устойчива снежна покривка в планинските части през зимните месеци и валежи през пролетта, началото на лятото и отчасти през есента. Лятото се характеризира с рядко наблюдаващи се краткотрайни интензивни валежи и преобладаващо изразено засушаване и максимални годишни температури.

Пълноводието на р. Осъм настъпва през периода март – май, когато пролетното снеготопене се съчетава с падналите върху водосбора валежи (фиг.2). Пълноводието на реката е до края на юни, а след това започва лятно – есенното маловодие.



Фиг. 2. Вътрешно годишно разпределение на оттока на р. Осъм при с. Изгрев за периода 1991-2020 г.

Fig. 2. Intra-annual distribution of the discharge at Izgrev station for the period 1991-2020 г.

### 3. МЕТОДОЛОГИЯ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

#### 3.1. Моделираща платформа

За да бъдат моделирани хидрологичните процеси във водосбора на р. Осъм е използван хидроложкият полуразпределен физически базиран числен модел SWAT (Soil and Water Assessment Tool).

SWAT е разработен за Селскостопанския изследователски център към министерството на земеделието на САЩ (United States Department of Agriculture (USDA)) с оглед използването му при дългосрочни, продължителни симулации с дневна стъпка по време. SWAT дава широки възможности за изследване на редица физически процеси в даден водосборен басейн по отношение на количественото и качествено изменение на речния отток – оценка и прогноза за изменение на водното количество, оценка и прогноза за водния баланс (Neitsch et al., 2005).

SWAT е физически базиран модел и симулира пространствените характеристики на водосборния басейн като го разделя на подводосбори, за всеки един от които генерира Хидроложки Единици (ХЕ) – Hydrologic response units (HRU). Една хидроложка единица описва уникалната съвкупност от хомогенни земно покритие, почвен тип и наклон на земната повърхност.

Входните данни за модела включват метеорологична информация (валеж, температура на въздуха и скорост на вятъра) и данни за водните количества, необходими за калибриране на модела. SWAT симулира метеорологичните условия на база информацията от най-близко разположената до центроида на всеки един подводосбор метеорологична станция.

Симулирането на хидроложките процеси във водосборния басейн в SWAT е разделено на две части: земна фаза на хидроложкия цикъл и фаза на движението.

Метеорологичните условия определят началните условия в уравнението на водния баланс, което е в основата на SWAT:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

където:

$SW_t$  - съдържание на почвената влага [mm] във време  $t$  [дни];

$SW_0$  - начално съдържание на почвената влага [mm];

$R_{day}$  - количество денонощен валеж [mm];

$Q_{surf}$  - количество повърхностен отток [mm];

$E_a$  - евапотранспирация [mm];

$w_{seep}$  - отток на гравитационна вода извън коренообитаемия слой почва (перколация) [mm];

$Q_{gw}$  - количество вода от подхранване от подземни води [mm].

Разделянето на водосбора на подводосбори и ХЕ дава възможност да се отразят промените в евапотранспирацията за различните типове почви и селскостопански култури. Оттокът се изчислява отделно за всяка ХЕ и се транслира, за да се получи общият отток за подводосбора. Този подход повишава точността на модела и дава по-детайлно физическо представяне на водния баланс.

В рамките на земната фаза на хидрологичния цикъл SWAT представя редица хидрологичните процеси, сред които инфилтрация, преразпределение на вода в почвата, перколация, евапотранспирация, подповърхностен отток, повърхностен отток и подхранване от подземни води.

В настоящото изследване потенциалната евапотранспирация е моделирана с формулата на Пенман – Монтейт, за което са необходими данни за температура на въздуха, относителна влажност, скорост на вятъра и слънчева радиация.

SWAT използва кинематичен модел, за да симулира подповърхностния отток за всеки един почвен слой, като отчита изменението на съдържанието на вода в почвата, хидравличната проводимост на почвата и наклоните на терена.

Обемът на повърхностния отток се изчислява за всяка ХЕ като се използва методът на кривата на оттока - SCS Runoff Curve Number (USDA-SCS National Engineering Handbook, 1973).

След като е определена приточността на вода към основното течение във водосбора, следва нейното рутиране в речната мрежа. SWAT приема, че основното речно легло има трапецовидна форма, а движението на водата в речната мрежа се описва с модел на дифузната вълна - в настоящата разработка SWAT е приложен, като е използван методът на Muskingum-Cunge, който отчита физическите характеристики на речното легло.

### **3.2. Оценка на работата на хидроложкия модел**

SWAT е приложен за водосбора на р. Осъм като е използвана метеорологична и хидрологична информация за периода 01.01.2015 г. – 31.12.2022 г. Избраният период включва влажни, средни и сухи години, като така е възможно в достатъчна степен да бъде параметризиран хидроложкия модел. Наличните данни са използвани за стабилизиране на началните условия/подгръване (2015 г.-2017 г.), калибриране (2018 г. – 2021 г.) и валидиране на модела (2022 г.).

В процеса на калибриране целта е да бъдат определени и редефинирани тези параметри, които позволяват по-добро симулиране на наблюдаваните водни количества (Balabanova et al., 2023). Процедурата за калибриране включва анализ на чувствителността по отношение на отделните параметри, за да бъдат идентифицирани тези от тях, които водят до най-голяма промяна в резултатите от моделирането. Това са обикновено и параметрите с които се калибрира модела.

За калибриране на хидроложкия модел са използвани следните критерии за точност:

1. Обемът на регистрирания отток, преминал през створа да е равен или близък до този на симулирания такъв;
2. Формите на хидрографите на симулирания и наблюдавания отток да бъдат близки или еднакви;
3. Добро описание на високите води - задава се определена стойност на водното количество, над която се прави оптимизация на симулациите по време и стойност;
4. Добро описание на ниските води - задава се определена стойност на водното количество, под която се прави оптимизация на симулациите по време и стойност.

Анализът на чувствителността е процес на определяне на степента на промените в резултатите от модела по отношение на промените във входните

параметри на модела (Koshinchanov&Tsarev, 2022). Даден параметър може да се счита за чувствителен тогава, когато дори и минимална промяна на стойността му води до съществена разлика в крайния резултат.

За калибриране, анализ на чувствителността на параметрите и оценка на неточността в работата на модела, е използван алгоритъмът SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting, version 2) на приложението SWAT-CUP (Abbaspour, 2007).

При калибрирането на модела е спазена последователността от калибриране на параметрите първо на повърхностния отток, след това на почвите и подземния отток. Калибрирането на модела започва с рedefиниране на параметрите във високите части на водосбора и оптимизацията им се движи от подводосборите в планинската част към тези в равнинната.

Основните статистически критерии, използвани за оценка на работата на модела, са коефициентът на ефективност на Наш-Сътклиф (NSE) (2) и процентното отклонение PBIAS (3):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{k=1}^N (Qo_k - Qs_k)^2}{\sum_{k=1}^N (Qo_k - \bar{Qo})^2} \quad (2)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{k=1}^N (Qs_k - Qo_k)}{\sum_{k=1}^N Qo_k} * 100 \quad (3)$$

където:

$Qo_k$  - наблюдавано водно количество в  $k$ -тия ден [ $m^3/s$ ];

$Qs_k$  - симулирано водно количество в  $k$ -тия ден [ $m^3/s$ ];

$\bar{Qo}$  - средноаритметична стойност на водното количество за изследвания период [ $m^3/s$ ];

$N$  - брой на дните в изследвания период.

Коефициентът на ефективност на Наш-Сътклиф изчислява корелацията между симулираното и измереното водно количество към регресионна линия със стойност 1. NSE варира между  $-\infty$  и 1.0, като  $NSE = 1$  е оптималната стойност. Стойности между 0.0 и 1.0 се разглеждат като добри, докато стойности по-малки от 0.0 показват, че средната наблюдавана стойност е по-добър предиктор от симулираната такава, което е индикатор за неефективност на модела.

Статистическият критерий PBIAS (процентно отклонение) е индикатор за средната тенденция на симулираните водни количества и дали са по-големи или по-малки от измерените. Оптималната стойност на PBIAS е 0, като положителните стойности показват занижаване на процентните разлики, а отрицателните – завишаване.

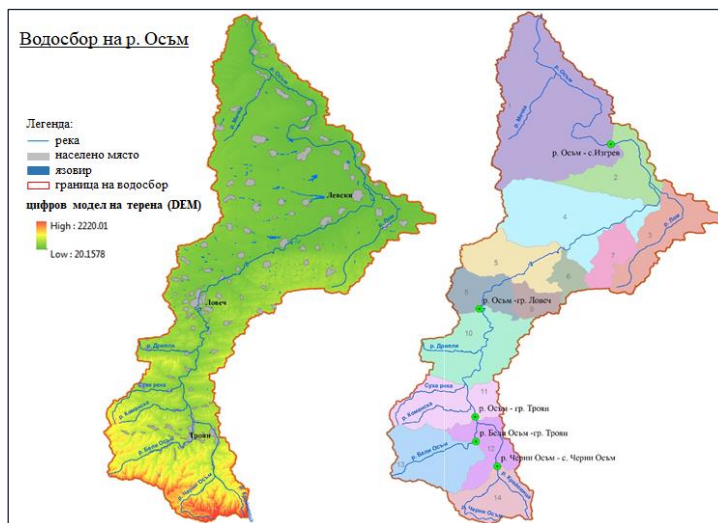
Оценката за представянето на калибрирания модел е направена съгласно методологията на Moriasi (Moriasi et al., 2007, 2012, 2015).

## 4. КОНСТРУИРАНЕ НА ХИДРОЛОЖКИЯ МОДЕЛ

### 4.1. Пространствена дискретизация на водосбора на р. Осъм

➤ *Цифров модел на терена [DEM]*

За водосбора на р. Осъм е използван цифров модел на терена с големина на клетката 25 m (Hiederer, 2013) – фигура 3, въз основа на който е генерирана речната мрежа във водосбора. След въвеждането на хидрометричните станции, във водосбора на р. Осъм са дефинирани 14 подводосбора (фигура 3).



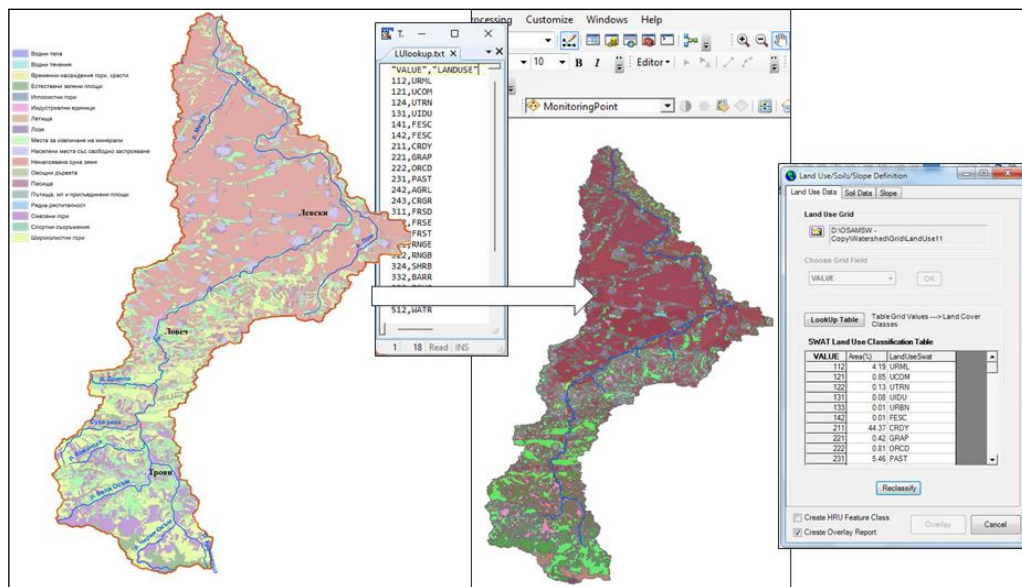
**Фиг. 3.** Цифров модел на терена на водосбора на р. Осъм и генериране на подводосбори  
**Fig. 3.** DEM of the Osam river watershed and subwatersheds definition

#### ➤ *Земно покритие*

На база информация от разработката CORINE LAND COVER (CLC) 2018 по програма „Коперник“ на ЕК (CORINE Land Cover, 2018) е подготвена карта на земното покритие за водосбора на р. Осъм - (фиг. 4). Информацията за земеползването съдържа природни и антропогенни характеристики и се използва за определяне на коефициентите на грапавина по Манинг, който влияе на скоростта на движение на водата по земната повърхност, в речното корито и формирането на оттока.

Във водосбора на р. Осъм са установени 22 бр. класа на земното покритие, като най-разпространени са земеделските земи в долната и средната част на водосбора и широколистните и смесените гори в Предбалкана и планинските части на водосбора.

За да бъдат записани характеристиките на различните класове земно покритие в базата данни на модела е необходимо информацията, получена на база картата от разработката CLC 2018 (фигура 4) да бъде приведена в съответствие с информацията от базата данни на SWAT, която от своя страна е взимствана от Класификацията на земното покритие и почвите на САЩ (USDA/ARS). В процеса на ре-класификация на информацията за земното покритие във водосбора на р. Осъм към наличните класове от земното покритие са присвоени съответните характеристики от базата данни на SWAT (фигура 4).



**Фиг. 4.** Рекласифициране на класовете на земното покритие  
**Fig. 4.** Reclassification of land use cover types in SWAT database

#### ➤ Почви

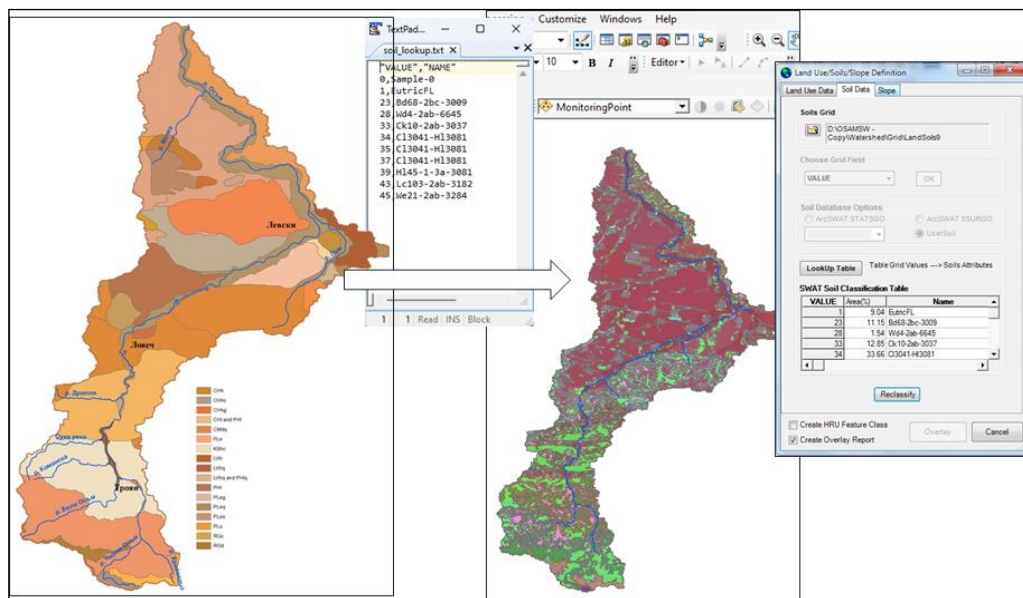
Типовете почви във водосбора на р. Осъм са определени, като е използвана почвената карта на НР България, съставена през 1968 г. под ръководството на проф. В. Койнов (Койнов, 1968) и класификацията на Организацията по прехрана и земеделие (FAO Soils).

Установени са 13 бр. почвени типове във водосбора. В припланинските и планинските райони почвените видове са светлосиви, сиви и кафяви горски, планинско-ливадни в най-високите части. Почвените типове в равнинната част на водосбора са карбонатни и типични черноземи.

Информацията, получена на база почвената карта на НР България (фигура 5) е приведена в съответствие с информацията от базата данни на SWAT, като към наличните почвени класове са присвоени съответните характеристики (фигура 5).

#### ➤ Наклони на земната повърхност

За определяне броя и границите на класовете на наклоните на земната повърхност във водосбора на р. Осъм е анализирана информацията от цифровия модел на терена са определени 5 бр. класове на наклоните: 0-3%, 3%-5%, 5%-10%, 10%-20% и >20%.



Фиг. 5. Рекласифициране на почвените класове  
Fig. 5. Reclassification of soil types in SWAT database

### ➤ Хидроложки единици

Рекласифицираните карти на земното покритие, почвените класове и наклоните се обединяват, като по този начин се генерират изчислителни Хидроложки Единици (част 3.1). SWAT модела процеса „валеж-отток“ във всяка една хидроложка единица.

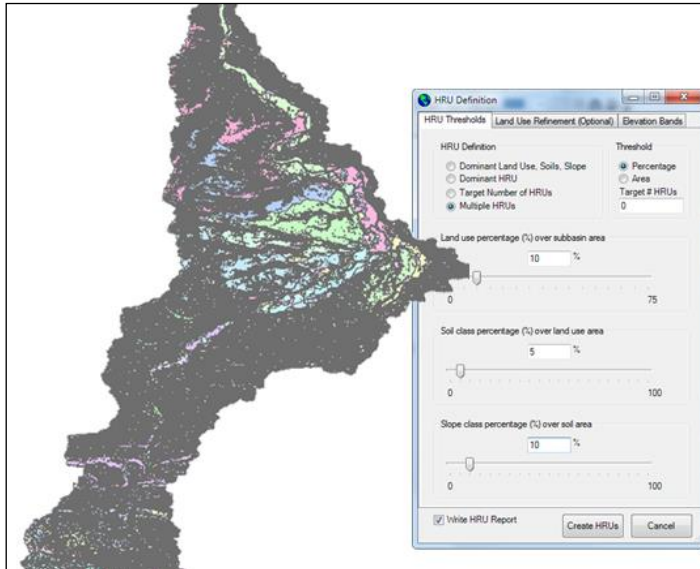
След анализ на площите и процентното разпределение на всеки един клас земно покритие, почвен тип и клас на наклона, е определено крайното разпределение и брой на ХЕ във водосбора на р. Осъм, като по този начин се оптимизира изчислителното време за хидрологичното моделиране. Окончателният брой на ХЕ във водосбора е 186 (фигура 6).

## 4.2. Хидрометеорологична информация за водосбора на р. Осъм

### 4.2.1. Метеорологична информация

Хидроложкият модел за водосбора на р. Осъм е разработен с метеорологична информация за периода 01.01.2015 г. – 31.12.2022 г. Източник на необходимите за хидроложкото моделиране входни данни - 24-часова сума на валежа, минимални и максимални денонощни температури, среднодневна скорост на вятъра и среднодневна относителна влажност, са 13 бр. метеорологични станции, разположени във водосбора. За по-добро представяне на пространствената

променливост на валежите са използвани и 2 бр. метеорологични станции извън водосбора на р. Осъм - фигура 7.



**Фиг. 6.** Задаване на прагове за определяне на крайното разпределение и брой на ХЕ във водосбора на р. Осъм

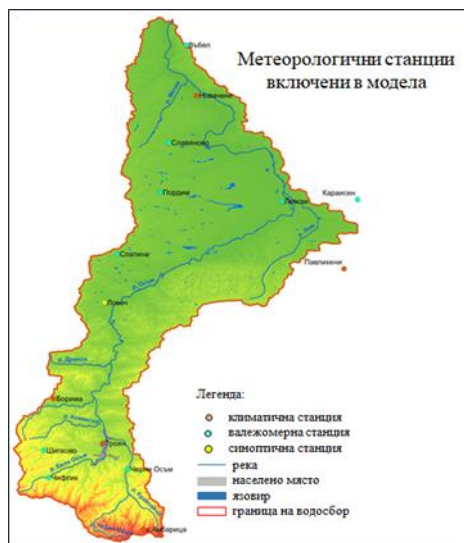
**Fig. 6.** Definition of the Hydrologic Response Units

➤ *Вертикален температурен градиент*

Предвид неравномерното и недостатъчно разпределение на метеорологичните станции с данни за температура на въздуха във водосбора (фигура 7), в модела е включен анализ на изменението на температурата на въздуха във височина. Изчисленият градиент на средногодишната температура на въздуха за водосбора на р. Осъм е  $0.52\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ .

➤ *Пространствено разпределение на валежа*

Предвид неравномерното разпределение на метеорологичните станции с информация за измерени количества на валежите във водосбора е включено и пространствено интерполиране на данните от метеорологичните станции. За определянето на тежестните коефициенти за станциите спрямо центроидите на отделните подводосбори са използвани полигони на Тисен.



Фиг. 7. Метеорологични станции във водосбора на р. Осъм

Fig. 7. Meteorological stations in Osam River watershed

#### 4.2.2. Хидрологична информация

Моделът за водосбора на р. Осъм е разработен с данни за измерени водни количества за периода 01.07.2015 г.–31.12.2022 г. от 5 хидрометрични станции във водосбора (фигура 1). Три от хидрометричните станции са разположени на основната река, а останалите две на притоците ѝ Черни Осъм и Бели Осъм.

#### 4.3. Допълнителни настройки

Надморската височина в планинската и припланинската части от водосбора се изменя в широки граници – от 363 m до 2194 m. За да бъде отчетено орографското влияние върху температурите и валежа тези подводосбори са разделени на височинни зони. Валежите, минималните и максималните температури на въздуха се изчисляват за всяка една височинна зона като функция на съответния градиент и разликата между надморската височина на валежмерната станция (съответният центроид) и средната надморска височина на всяка една височинна зона в рамките на един подводосбор.

Процесите, които се моделират отделно за всеки един от тези подводосбори са натрупването на снежна покривка, сублимацията и снеготопенето (Neitsch et al., 2002). Аналогично на преизчислението на валежните суми и температурите, за всяка една височинна зона се определят сублимацията и снеготопенето, след което за всеки подводосбор се изчисляват средните им стойности, които се използват при симулациите в процеса на калибриране.

По подразбиране в модела е заложен коефициент на грапавина по Манинг 0.14 за речното корито. Този коефициент е рedefиниран както за основното течение,

така и за притоците (Chow, 1959). Приетите нови стойности варират от 0.035 до 0.06 в зависимост от характеристиките на съответния речен участък.

## 5. РЕЗУЛТАТИ ОТ ХИДРОЛОГИЧНОТО МОДЕЛИРАНЕ КАЛИБРИРАНЕ, АНАЛИЗ НА ЧУВСТВИТЕЛНОСТТА НА ПАРАМЕТРИТЕ, ВАЛИДИРАНЕ НА МОДЕЛА

Моделът за водосбора на р. Осъм е калибриран с данни за измерени водни количества за периода 01.01.2018-31.12.2021 г. от всички пет хидрометрични станции във водосбора.

Калибрирането на хидроложкия модел е отнесено към симулиране на речния отток, така че резултатите от сравнение между симулираните и измерените водни количества в определените мониторингови точки (всички пет хидрометрични станции във водосбора на р. Осъм) да са статистически значими.

Чрез проведения паралелно с калибрирането анализ на чувствителността на параметрите е определен и окончателният брой на параметрите и съответните им стойности, с които е калибриран хидроложкия модел (Таблица 1).

**Таблица 1.** Окончателен брой и стойности на параметрите, с които е калибриран хидроложкия модел

**Table 1.** Final values of the parameters used for model calibration

	Гранични ст-ти	Окончателна стойност / ниво подводосбор						
		2	5-7, 9	10	11	12	13	14
Cn2	-	-0.24%	-0.49%	-0.01%	-	-	-0.058%	
Ch_N2	[0, 0.3]	-	-	-	-	-	0.0608	-
Sol_AWC	-	-	-	-	-	0.937 (FRST)	0.0625 (FRSD)	
Sol_K	-	-	-	-	-	-	-	-0.137%
ALAI	[0, 8]	-	-	-	-	-0.224% (FRSD)		
BLAI	[0, 8]	-	+0.25% (FRSD)	-	-	+0.29 (FRST)	+0.25% (FRSD)	+0.19% (RNGE) +0.29 (FRST) +0.25% (FRSD)
ESCO	[0, 1]	-	-	-	-	0.99		
CANMX	[0, 100]	-	95.83 (FRSD)	-	-	95.83 (FRSD)	72.50 (FRST)	
SMTMP	[-5, 5]	-	+2.6	-	-	-	-	-
SFTMP	[-5, 5]	-	+1.2	-	-	-	-	-

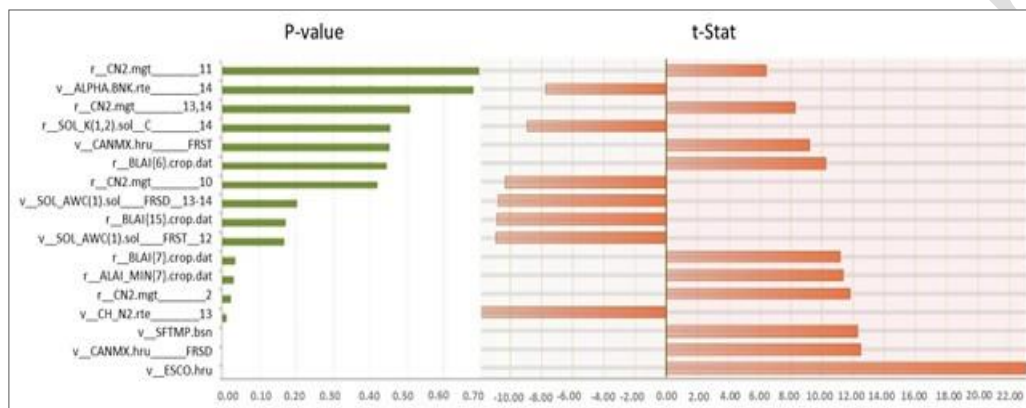
За да се оценят значимостта на параметрите, с които е калибриран модела и взаимодействието им по отношение на крайния резултат, е разгледан и общият анализ на чувствителността на параметрите. Чувствителността на всеки един от параметрите се изчислява с помощта на множествена регресия:

Чувствителността на всеки един параметър се оценява с помощта на *t-test* (*t*-критерий/разпределение на Стюдънт). Чрез *t*-критерия се представя степента на чувствителност на параметъра като по-големите абсолютни стойности показват по-голяма чувствителност.

Значимостта на всеки един параметър се оценява с критерия *P-value* (*P*-стойност). *P*-стойността е показател за значимостта на чувствителността, като

стойности по-малки от 0.05 определят параметъра като чувствителен. Р-стойности по-големи от 0.05 са индикатор, че изменението на параметъра не води до промяна в резултата, което го определя като нечувствителен.

На фигура 8 са представени резултатите от анализа на чувствителността на окончателно приетите параметрите на хидроложкия модел за водосбора на р. Осъм.



Фиг. 8. Общ анализ на чувствителността на параметрите  
Fig. 8. Global sensitivity analysis

Общо за водосбора с най-голямо значение за резултатите от хидроложкото моделиране са параметрите Cn2 (крива на оттока) и BLAI (индекс на максималната потенциална листна площ). Кривата на оттока характеризира оттокообразуващата способност на всеки един подводосбор в зависимост от земното покритие и почвените характеристики. BLAI определя максималното количество листна маса, която дадена растителност може да развие при идеални условия на средата.

За високо разположените подводосбори чувствителни са и почвените параметри SOL\_AWC и SOL\_K, които представят съответно свободния воден обем в почвения слой и ефективната хидравлична проводимост на алувия в основното течение.

В равнинната част от водосбора на р. Осъм са чувствителни и параметрите SFTMP и SMTMP, които представят съответно температурата, при която вали сняг и температурата, при която снегът се топи.

На фигури фигури 9 - 13 са представени графичните резултати от моделирането с калибрираните параметри с 24-часова стъпка.



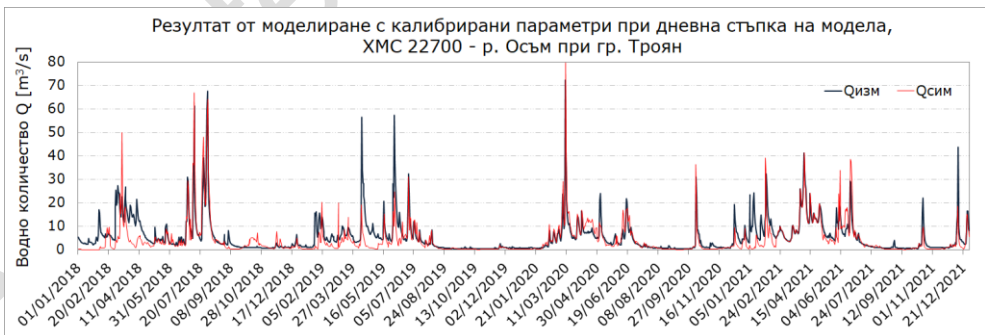
**Фиг. 9.** Резултат от симулиране на водното количество при ХМС 22350 – р. Бели Осъм при гр. Троян

**Fig. 9.** Discharge simulation result at HMS 22350 Beli Osam – Troyan



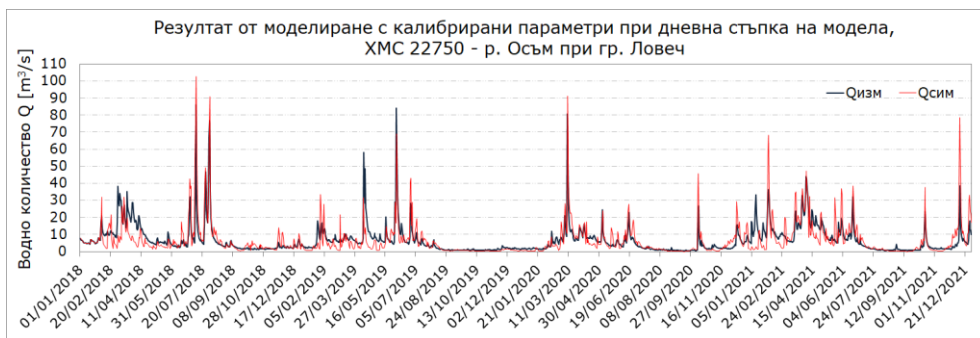
**Фиг. 10.** Резултат от симулиране на водното количество при ХМС 22650 – р. Черни Осъм при с. Черни Осъм

**Fig. 10.** Discharge simulation result at HMS 22650 Cherni Osam – Cherni Osam



**Фиг. 11.** Резултат от симулиране на водното количество при ХМС 22700 – р. Осъм при гр. Троян

**Fig. 11.** Discharge simulation result at HMS 22700 Osam – Troyan



**Фиг. 12.** Резултат от симулиране на водното количество при ХМС 22750 – р. Осъм при гр. Ловеч

**Fig. 12.** Discharge simulation result at HMS 22750 Osam – Lovech



**Фиг. 13.** Резултат от симулиране на водното количество при ХМС 22800 – р. Осъм при с. Изгрев

**Fig. 13.** Discharge simulation result at HMS 22800 Osam – Izgrev

Графичното представяне на резултатите от калибрирания модел с дневни стойности показват много добра сходимост между моделираните и измерените водни количества. При почти всички мониторингови точки моделираните дневни водни количества са занижени при ниските и средните води. Изключение е ХМС 22700 – р. Осъм при гр. Троян, където моделираните водни количества са завишени при средните и високите води и са занижени при ниските, което се вижда и от резултатите за PBIAS (Таблица 2).

При валидирането на хидроложкия модел за водосбора на р. Осъм е избран период с преминала висока вълна и регистрирани максимални водни количества при всички хидрометрични станции във водосбора (28.08.2022 г. – 20.09.2022 г.). В табл. 2 са представени статистическите оценки на резултатите от моделирането на водните количества във водосбора на р. Осъм за периодите на калибриране и валидиране.

**Таблица 2.** Статистически оценки на резултатите от моделиране с калибрирани параметри – за периода на калибриране и за периода на валидиране.

**Таблица 2.** Statistical estimates of the simulation results using calibrated parameters—for the periods of calibration and validation.

Станция / Критерий	резултат от калибриране		резултат от валидиране	
	NSE	PBIAS	NSE	PBIAS
22350	0.56	33	0.69	0
22650	0.55	16	0.75	-19
22700	0.58	-3	0.65	-14
22750	0.65	28	0.77	-24
22800	0.64	18	0.71	-15

Съгласно насоките на Мориаси за оценка на хидроложки модел, резултатите от калибрирането на модела със стъпка 24 h го определят като „добър“ в горната част от водосбора (при ХМС 22350, 22650 и 22700) и „много добър“ в долната част от водосбора (при ХМС 22750 и 22800).

Статистическите критерии за оценка на работата на модела в периода на валидиране го определят като „много добър“. Критерият PBIAS за оценка на работата на модела в периода на валидиране показва, че моделът завишава водните количества при всички контролни точки, с изключение на тази при с. Бели Осъм (ХМС 22350).

## 6. ПРИЛОЖЕНИЕ НА КАЛИБРИРАНИЯ МОДЕЛ ЗА ПРОГНОЗИРАНЕ НА ВОДНИТЕ КОЛИЧЕСТВА ВЪВ ВОДОСБОРА НА Р. ОСЪМ

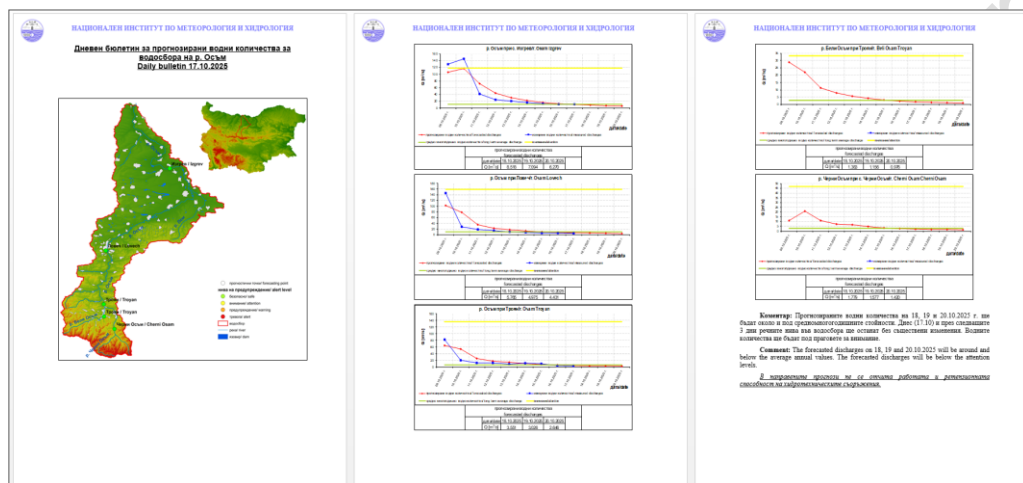
Резултатите от моделирането на хидрологичните процеси във водосбора на р. Осъм показват, че SWAT успешно симулира процеса „валеж-отток“, като симулираните водни количества съответстват на измерените такива. Това е и индикатор, че така калибрираният модел може да бъде използван за прогнозиране на речния отток във водосбора на р. Осъм.

Като контролни точки, към които ще се прогнозира речния отток във водосбора са включени хидрометричните станции по основното течение на реката (ХМС 22700 - р. Осъм при гр. Троян, ХМС 22750 - р. Осъм при гр. Ловеч и ХМС 21800 - р. Осъм при с. Изгрев ) и на притоците Бели Осъм (ХМС 22350 – гр. Троян) и Черни Осъм (ХМС 22650 – с. Черни Осъм).

Използвана е прогностична метеорологична информация от интегрираната прогностична система на Европейския център за средносрочни прогнози за времето – ECMWF IFS. За всеки центроид на отделните подводосбори се определят прогностичните стойности за валежа и минималните и максималните температури на въздуха за три дни напред.

Ежедневната прогноза за речния отток е представена като графики, таблици и коментар за прогнозираните водни количества за следващите три дни и отчетени по временни ключови криви водни количества за девет дни назад (фиг. 14). Със зелен цвят е указано нивото на средномногогодишното водно количество при съответния прогностичен пункт. На графиките са изобразени и нива на

предупреждение – внимание (жълто), предупреждение (оранжево) и тревога (червено). Тези нива на предупреждение са определени статистически, на базата на историческа хидрологична информация, и съответстват на водни количества с повторяемост веднъж на две години (жълто), на двадесет години (оранжево) и веднъж на сто години (червено).



Фиг. 14. Дневен бюлетин за прогнозиран воден количества за водосбора на р. Осъм  
Fig. 14. Daily bulletin on forecasted discharges for the Osam River basin

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящата статия представя резултатите от изследването на хидрологичния отговор на водосбора на р. Осъм към метеорологичните условия с използването на физически базирания полуразпределен числен модел SWAT (Soil and Water Assessment Tool).

SWAT е утвърден в световната практика хидроложки модел с широк спектър на приложение и е водещ инструмент в изследването на хидроложкия режим и прогнозиране на речния отток. Моделът е адаптиран към хидрологичните условия във водосбора на р. Осъм, като са използвани данни от наличните метеорологични и хидрометрични станции от мониторинговата мрежа на НИМХ, както и информация за физико-географските параметри на водосбора.

За да бъде представително моделирането на хидрологичните процеси в SWAT, е необходимо използването на надеждна пространствена информация за дискретизация на физическите параметри на модела.

Резултатите от хидрологичното моделиране показват, че моделът успешно възпроизвежда основните хидроложки характеристики на водосбора, като демонстрира много добро съответствие между наблюдаваните и симулираните стойности на водните количества. Това се потвърждава от анализа на графичното

представяне на резултатите от симулациите и от значимите статистически резултати.

Добрите резултати от хидроложките симулации са индикатор за надеждността на включената в моделирането пространствена информация. Това показва, че резолюцията на използваните данни за топографията, земното покритие и почвите е оптимална, а пространственото разпределение на валежа във водосбора е достатъчно представително.

Така съставеният хидроложки модел за водосбора на р. Осъм демонстрира, че SWAT успешно симулира процеса „валеж-отток“, затова и моделът е приложен за прогнозиране на водните количества във водосбора на реката. Предстои да бъдат анализирани и оценени резултатите от моделиране на ежедневни водни количества с прогностична метеорологична информация във водосбора на р. Осъм.

## ЛИТЕРАТУРА

- Балабанова Сн. (2011). Дисертация "Оперативно хидроложко моделиране на речния отток и ресурсни оценки с приложение на ГИС"
- Генерални схеми за използване на водите в районите за Басейново управление, Том II Дунавски район, 2000 г, Институт по Водни Проблеми – БАН.
- Койнов В., Кабакчиев И., Бонева В. (1968). Атлас на почвите в България, Земиздат, 321 стр.
- Кошинчанов Г. (2017). Дисертация „Хидроложко и хидравлично моделиране на избрани поречия за нуждите на изграждане на системи за ранно предупреждение от наводнения“
- Кючукова М. (1979). Климатичен справочник за НР България, Том II, Влажност на въздуха, мъгла, хоризонтална видимост, облачност и снежна покривка, Наука и Изкуство, 812 стр.
- Abbaspour K.C. (2007). User manual for SWAT-CUP, SWAT Calibration and Uncertainty Analysis Programs. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag, Dübendorf, Switzerland
- Abbaspour KC, Yang J, Maximov I, Siber R, Bogner K, Mieleitner. Balabanova S., Yordanova V., Stoyanova V. (2023). Neural network-based models for Struma river flow forecasting, International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 2023 (25), p. 107-114.
- Bojilova E. (2011). Flow modeling of the Yantra River, Bulgaria, XXV-th Conference of the Danubian Countries.
- Chow V.T. (1959). Open-channel hydraulics, McGraw-Hill, New York.
- European Environment Agency, 2019. CORINE Land Cover (CLC) 2018, Version 17. CRC/TR32 Database (TR32DB).
- FAO soils (an open information system), <http://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-classification/en/>.
- Hiederer R. (2013). Mapping Soil Properties for Europe - Spatial Representation of Soil Database Attributes. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 47pp. – EUR26082EN Scientific and Technical Research series, ISSN 1831-9424, doi:10.2788/94128.

- Koshinchanov G., Tsarev P. (2022). Comparison of simulated discharge over Ogosta river basin using ground, satellite and merged data as precipitation input for the purpose of flood forecasting, Conference of the Danubian Countries on Hydrological Forecasting and Hydrological Bases of Water Management, p. 117-122.
- Moriassi D.N., Arnold J.G., Van Liew M.W., Bingner R.L., Harmel R.D., Veith T.L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations, Transactions of the ASABE 2007, v.50, no. 3, p. 885-900.
- Neitsch S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R., Williams J.R., King K.W., (2005). Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2005. In: Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service. US Department of Agriculture, Temple.
- Neitsch S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R., R. Srinivasan, Williams J.R., (2002). Soil and Water Assessment Tool User's manual.
- Nikolov D., Bocheva L., Marinova T., Malcheva Kr., Evgeniev R. (2019). Preliminary results of the snowfall changes and variation of maximum snow cover depth for the territory of Bulgaria (1961-2015), International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 2019 (19), p. 1025-1031.
- Stoyanova, S. (2021). Hydrological modeling for Water Balance Components Assessment, Proceedings of the XXIX Conference of the Danubian Countries on Hydrological Forecasting and Hydrological Bases of Water Management, ISBN 978- 80-7653-031-7, pp 244-249.
- USDA-SCS National Engineering Handbook (1973). Soil Conservation Service, U.S. Department of Agriculture.
- Yordanova, V., Balabanova, Sn., Stoyanova, V. (2017). Application of the topkapi model on the Ogosta river basin, Electronic book with full papers from XXVII Conference of the Danubian Countries on Hydrological Forecasting and Hydrological Bases of Water Management, 2017, ISBN:978-954-90537-2-2, 357-364