

Дисертационният труд се състои от 5 глави и е с обем 137 стр. Съдържа 133 фигури, 21 таблици и 35 уравнения. Използваната литература включва 90 заглавия.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита на заседание на разширен научен семинар на департаменти „Прогнози и информационно обслужване“ и „Хидрология“, проведен на 21.02.2023 г., съгласно заповед № НД 04-1/17.02.2023 г. на Генералния директор на НИМХ.

Състав на научното жури:

проф. д-р Пламен Нинов - НИМХ
доц. д-р Снежанка Балабанова - НИМХ
проф. д-р Богдан Казаков - УАСГ
проф. д-р Николай Лисев - УАСГ
доц. д-р Венци Божков – УАСГ

Резервни членове:

доц. д-р Елена Божилова - НИМХ
доц. д-р Мартина Печинова - УАСГ

Защитата на дисертационния труд ще се състои на 15.06.2023 г. в 14:00 часа в зала „Акад. Любомир Кръстанов“ на НИМХ, гр. София

Материалите по защитата ще са на разположение на интересувашите се в канцеларията на НИМХ и на интернет страницата на института:
www.meteo.bg

Номерата на фигури, таблици и уравнения в автореферата не следват тези в дисертацията, а са дадени в последователен ред.

ABSTRACT

In this dissertation the results of the development and performance of an innovative approach for studying various hydrological processes via the application of the physically-based semi-distributed hydrological SWAT model are presented.

The model was adapted for application over the Vit river watershed using measured hydrometeorological daily time series data for the period 2015–2020. Being physically based 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 six 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 ($NSE \geq 0.77$) streamflow simulations for mid and downstream Vit river and satisfactory ($NSE = 0.51$) for the major Vit tributary (Kametitsa river). The statistics for upstream Vit watershed showed good results for monthly time step streamflow simulations while for simulations on a daily time step the results were not satisfactory. The validation of the model for simulations on a daily time step showed very good results for Vit main stream and good ones for Kamenitsa tributary.

The calibrated SWAT model was used for water balance assessment, streamflow forecasting and landuse/landcover change impact study for the Vit river watershed. Vit river catchment water balance modelling showed that “rainfall-runoff” process was successfully simulated by SWAT. The model had well represented yearly water balance with simulated runoff volume values being near the measured ones. Simulation of daily discharges with forecasted meteorological data from ALADIN-BG and ECMWF – IFS numerical models showed good results with the calibrated SWAT model given both the simulated shape of the hydrograph and the time of occurrence of the peak flow. A research of landuse change impact on the Vit watershed hydrological processes was also performed. Calibrated SWAT model was applied using the same meteorological input time series data (2015–2020) and two landuse/landcover scenarios (CLC2012 and HERCULES). Compared to CLC2012 the HERCULES future landuse change scenario simulation results showed a tendency toward maximal peak flow increase and decrease of minimal runoff.

The study delivered within this PhD thesis was also the basis for implementing the research results in practice. A daily streamflow forecast for the Vit river is to be published in a hydrological bulletin on the “Hydrological Information and Forecast” webpage: <http://hydro.bg/>. In addition runoff volume assessment on a monthly and yearly basis for the Vit river watershed is to be part of both the monthly and the yearly Hydrometeorological Bulletin of the National Institute of Meteorology and Hydrology.

СЪДЪРЖАНИЕ:

Въведение	- 1 -
Актуалност	- 1 -
Основни цели и задачи	- 2 -
I. Преглед на световния опит в областта на хидроложкото моделиране	- 3 -
I.1. Хидроложки цикъл. Моделиране на физичните процеси във водосборната област.	- 3 -
I.2. Развитие, класификация и приложение на хидроложките модели	- 3 -
I.3. Хидроложки модели използвани в практиката на НИМХ.	- 3 -
I.4. Изводи	- 4 -
II. Описание на изследвания водосбор	- 5 -
II.1. Физикогеографски характеристики	- 5 -
II.2. Климатична характеристика	- 5 -
II.3. Хидроложки режим на р. Вит	- 6 -
II.4. Изводи:	- 7 -
III. Избор на моделираща платформа. създаване на основа за хидрологичния модел	- 7 -
III.1. Представяне на модела SWAT	- 8 -
III.2. Създаване на основа за хидрологичния модел	- 11 -
III.3. Изводи	- 15 -
IV. Прилагане на SWAT за водосбора на р. Вит	- 16 -
IV.1. Резултати от моделиране с първоначално приети от подложната информация физически базирани параметри	- 17 -
IV.2. Калибриране на модела. Анализ на чувствителността на параметрите и оценка на неточностите в работата на модела	- 22 -
IV.3. Резултати от симулации с калибриран модел	- 28 -
IV.4. Валидиране на модела	- 32 -
IV.5. Изводи	- 34 -
V. Приложения на хидроложкия модел	- 35 -
V.1. Оценка на водния баланс за водосбора на р. Вит	- 35 -
V.2. Прогнозиране на речния отток във водосбора на р. Вит	- 40 -
V.3. Изследване влиянието на земеползването (земното покритие) върху режима на речния отток във водосбора на р. Вит	- 44 -
Приноси	- 54 -
Публикации	-54-

ВЪВЕДЕНИЕ

Значимостта на пресните води на сушата е заключена в процесите на тяхното формиране, в процеса на кръговрата на водата и чрез него в непрекъснатото им обновяване. Кръговратът на водата е и процесът, който свързва пресните водни ресурси (водата в речното легло, подземните води и влагата в почвата) в едно. Затова и оценката на компонентите на водния баланс е важна за оптималното използване на водния ресурс.

Пресните водни ресурси са неравномерно разпределени в пространството и със значителните колебания във времето. За правилното управление и оптималното използване на водния ресурс е необходимо промените в режима на речния отток да бъдат предвидени своевременно с висока достоверност. Хидрологичната прогноза предоставя необходимата информация за обезпечаване на оптимално, комплексно използване на водните ресурси и осигуряване на максимален икономически ефект. Хидрологичната прогноза е и основният инструмент при издаване на предупреждения за опасност от екстремни хидрологични явления.

През последните години естественият кръговрат на водата в природата е подложен на множество различни въздействия, което засилва уязвимостта към екстремни хидрологични явления. Главен източник на промените в хидрологичната система е промяната на земеползването - един от най-динамично развиващите се компоненти на антропогенната дейност, който води до безпрецедентни промени на ландшафтите, екосистемите и околната среда. Свързаната със земеползването промяна на земната покривка оказва пряко влияние на хидрологичния режим в речните басейни като ги прави почувствителни към неблагоприятните метеорологични условия.

Математическото моделиране е една от възможностите да бъдат детайлно изследвани и симулирани редица процеси от кръговрата на водата. Съвременните хидроложки модели са комплексно решение за представяне на хидроложките условия в даден водосборен басейн като развитието им през последните години допринася за повишаване на точността на хидроложката прогноза, за по-детайлното изследване на изменението на хидроложкия режим и за по-прецизния хидроложки анализ.

АКТУАЛНОСТ

Наводненията са сред най-опустошителните природни бедствия засягащи много региони по света всяка година. По данни на Националния статистически институт в нашата страна през последните 10 години възникналите кризисни събития, породени от наводнения са средно по около 400 броя всяка година, установените щети възлизат на над 100 000 хил. лева средно за всяка година.

Антропогенната дейност, климатичните промени и промените в социално-икономическите условия са основните фактори, които допринасят за уязвимостта на обществото към екстремни явления каквито са наводненията. Наблюдаваната в последните години тенденция към

разрастване на урбанизацията, обезлесяване и намаляване на земеделските площи влияе значително на хидрологичния цикъл като променя режима на речния отток и количеството му.

Неравномерното разпределение на водните ресурси на територията на страната и големите колебания на валежите през отделните години също са сред факторите, които оказват пряко влияние върху хидрологичния режим на реките.

Според множество научни изследвания от последните години доклади и резолюции на редица международни организации (СМО, ФАО, ЕАОС) все по-ясно се аргументира изводът, че рискът от наводнения вероятно ще се увеличи в бъдеще и в резултат на социално-икономически промени, сред които увеличаване на населението в градовете и свързаните с това промени в земеползването, вида на земната покривка, обезлесяването.

Настоящият дисертационен труд е ориентиран към изследване на основните хидрологични процеси в рамките на пилотен водосбор като ги разглежда през призмата на актуалните и очакваните бъдещи предизвикателства за контрола, използването и управлението на водните ресурси. Темата на дисертацията дава възможност да се проучи използването на полуразпределения физически базиран хидроложки модел SWAT (Soil and Water Assessment Tool), който представя речния отток като функция на метеорологична входна информация и геоморфологичните характеристики на водосбора. SWAT е широко застъпен и утвърден в световната практика хидроложки модел, чийто развитие и приложение в последните години го определят като устойчив и комплексен съвременен инструмент за прогнозиране на речния отток, представяне на прогнози за наводнения, оценка на водния баланс, изследване на различни бъдещи сценарии на промяна на хидроложкия режим.

ОСНОВНИ ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ

Основната цел на настоящия дисертационен труд е с помощта на численото моделиране да бъдат изследвани различни хидроложки процеси:

➤ да се приложи подходящ хидроложки модел, с помощта на който да бъдат изготвяни хидроложки прогнози и навременни предупреждения при опасност от наводнения във водосбора на р. Вит;

➤ да се симулират елементите на водния баланс във водосбора на р. Вит и да могат да се правят оценки на обема речния отток на месечна и годишна база;

➤ да се изследва бъдещото изменение на речния режим във водосбора на р. Вит под действието на промяна в земеползването и съответно земното покритие;

За постигане на поставените цели трябва да бъдат изпълнени следните задачи:

✓ проучване на научна литература и добри практики свързани с различни хидроложки модели използвани в хидроложкото прогнозиране;

- ✓ анализ на физичните процеси и хидрографските характеристики свързани с генерирането на оттока;
- ✓ проучване на приложимостта на физически базиран полуразпределен модел за симулиране на оттока в пилотен водосбор;
- ✓ определяне на параметрите, които оказват най-голямо влияние върху хидроложкия режим във водосбора;
- ✓ анализ на чувствителността на модела към различните параметри и изменението на стойностите им;
- ✓ калибриране и валидиране на хидроложкия модел;
- ✓ прилагане на разработения модел за прогнозиране на речния отток;
- ✓ прилагане на разработения модел за определяне на компонентите на хидроложкия цикъл и оценка на обема на речния отток на месечна и годишна база;
- ✓ изследване на изменението на речния режим във водосбора в резултат от промяна в земеползването и съответно земното покритие;

I. Преглед на световния опит в областта на хидроложкото моделиране

I.1. Хидроложки цикъл. Моделиране на физичните процеси във водосборната област.

Непрекъснатата циркулация на водата от атмосферата към земята и връщането ѝ към атмосферата чрез кондензация, валежи, повърхностен отток, изпарение и транспирация се нарича хидроложки цикъл.

Математическото моделиране е една от възможностите да бъдат детайлно изследвани и симулирани процесите от хидроложкия цикъл.

Речният басейн определя връзката между валежите, оттока и изпарението (водния баланс), а от друга осигурява преразпределение на оттока във времето и пространството. Тези два процеса са залегнали в основата на всички модели от типа „валеж – отток“.

I.2. Развитие, класификация и приложение на хидроложките модели.

Хидроложките математически модели представят процеса „валеж-отток“. Те са важни както за планиране, развитие и управление на водните ресурси, така и за прогнозиране на наводнения, качество на водата.

Според представянето на процесите хидроложките модели са емпирични, физически или концептуални модели.

Според типа моделиране на процеса „валеж-отток“ моделите могат да бъдат класифицирани като:

- Модели със съсредоточени параметри (Lumped models).
- Модели с полуразпределени параметри (Semi-distributed models).
- Модели с разпределени параметри (Distributed models).

I.3. Хидроложки модели използвани в практиката на НИМХ.

- Изкуствени невронни мрежи (Artificial Neural Networks - ANN)

ANN се прилагат в НИМХ за прогнозиране на водни количества за водосбора на р. Искър - <http://hydro.bg/>. Входни данни са: хидроложки и метеорологични данни от мониторинговите мрежи на института, водното количество от предишния ден, акумулираният валеж от предишните три дни. Използваният софтуер е NeuroSolutions - <http://www.neurosolutions.com/>.

➤ MIKE 11 (понастоящем MIKE HYDRO River) by DHI (Danish Hydraulic Institute)

НАМ модулът на модела MIKE 11 е използван от НИМХ в Система за ранно предупреждение за наводнение за река Марица и Тунджа - <https://maritsa.meteo.bg> както и за прогнозиране на водни количества за водосборите на р. Русенски Лом и р. Факийска <http://hydro.bg/>.

➤ HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System)

В НИМХ този модел се прилага за прогнозиране на водни количества към хидрометричните станции във водосбора на река Янтра <http://hydro.bg/>.

➤ ISBA – TOPMODEL

Моделиращата система ISBA-TOPMODEL е използвана в Системата за ранно предупреждение за наводнения за река Арда - <https://arda.hydro.bg/bg/index.php?glaven=alertmap> и за прогнозиране на водните количества към крайните станции на реките Огоста, Вит и Осъм в рамките на проект Danube WATER integrated management.

➤ LISFLOOD

В НИМХ за съставянето на ежедневната хидроложка прогноза се използват резултатите от модела LISFLOOD и се валидират екстремни явления.

➤ ТОРКАPI (ТОРographic Kinematic APproximation and Integration)

Моделът ТОРКАPI е приложен в практиката на НИМХ за прогнозиране на оттока във водосборите на р. Огоста и р. Айтоска.

I.4. Изводи

Развитието на моделите, използвани в хидроложкото моделиране е важно за изготвяне на хидрологични прогнози и за прогнозиране на явления с екстремен характер.

Няма универсален модел, но в зависимост от целите, наличната информация и опита на моделиера може да се избере един или друг хидроложки модел.

В тази глава е представено развитието на хидроложките модели с техните предимства и недостатъци. Описани са също и използваните в практиката на НИМХ хидроложки модели за прогнозиране на речния отток и тяхното приложение в системите за ранно предупреждение.

II. Описание на изследвания водосбор

В настоящата разработка физически базираният, полуразпределен модел SWAT е използван за изследване на хидрологичните процеси във водосбора на река Вит. При избора на пилотен водосбор са взети под внимание резултатите от предварителната оценка за значителен потенциален риск от наводнения, които са изготвени за всеки район за басейново управление по отношение на човешкото здраве, стопанската дейност, околната среда и културното наследство.

II.1. Физикогеографски характеристики

Река Вит се образува от сливането на реките Черни Вит и Бели Вит в района на гр. Тетевен (кв. „Полатен“), на 367 m н.в. За начало на река Вит официално е приета р. Бели Вит, която започва течението си югоизточно от връх Вежен в Златишко – Тетевенската планина под името Стара Рибарица. Река Стара Рибарица събира водите на Юмрушко дере, Рибаришки дол и Зеленишки дол, тече в северозападна посока под много голям наклон (до 200 ‰), в тясно корито със стръмни брегове. Стара Рибарица приема името Бели Вит след вливането в нея на р. Дебелщица при с. Рибарица.

Общата дължина на р. Вит е 183.5 km, а площта на водосборния ѝ басейн е 3227.6 km².

Релеф

Река Вит води началото си от Главната Старопланинска верига. Тя тече по северните склонове на Златишко-Тетевенската планина, събира водите на Предбалкана и протича през Дунавската равнина.

Долина и корито на р. Вит

В най-горното ѝ течение (над с. Рибарица) надлъжният наклон на реката е много голям, над 200 ‰, но към Тетевен достига 10 ‰.

Водосборната област на р. Бели Вит представлява красива продълговата планинска котловина, заобиколена от масивите на северните склонове на Стара планина, гъсто прорязани от множеството притоци.

Залесеност

Водосборната област е силно залесена, като незалесени части са изключително скалистите ридове.

Почви

От север на юг почвените типове във водосбора на р. Вит са алувиално-ливадни почви, черноземи - карбонатни и типични, излужени и оподзолени, сиви горски почви, кафяви горски, планинско – ливадни, а като аazonален почвен тип са разпространени торфено-блатните почви.

II.2. Климатична характеристика

Водосборът на р. Вит попада в умерено-континенталната климатична подобласт, която се характеризира с голяма годишна температурна амплитуда, топло лято и студена зима, пролетно-летен максимум и зимен минимум на валежите, ежегодна и сравнително устойчива снежна покривка.

Температура на въздуха¹

Според пространственото разпределение на климатичните норми на средногодишната температура на въздуха за периода 1991-2020 г. в страната средната температура на въздуха за равнинната и полупланинска част от водосбора на р. Вит е 11.8 °С. За планинския дял от водосбора средната годишна температура на въздуха е около 6 °С, като в най-високо разположените планински части (с н.в. над 2000 m) средната температура на въздуха е около -1 °С.

Валежи

За водосбора на р. Вит средният многогодишен валеж за периода 1991-2020 г. се изменя в широки граници – от около 500-550 mm в Дунавската равнина до 1000 mm в планинската му част.

Снежна покривка

За разположените в Дуннавската равнина и високите полета части от водосбора на р. Вит продължителността на снежната покривка е между 45 и 60 дни. В старопланинската част от водосбора в районите с надморска височина между 800 и 1000 m има годишно от 50 до 85 дни със снежна покривка, в районите от 1000 до 1500 m н.в. има от 80 до 120 дни, в районите от 1500 до 2000 m н.в. от 120 до 160 дни, а във високопланинската част над 2000 m н.в. от 180 до 200 дни.

II.3. Хидроложки режим на р. Вит

Понастоящем отточният режим на р. Вит се следи от петте хидрометрични станции при с. Черни Вит, гр. Тетевен, с. Търнене, с. Крушовица и с. Биволаре. Режимът на най-същественият приток, р. Каменица (Каменка) се наблюдава от хидрометричната станция при с. Бежаново.

Пълноводието на р. Вит настъпва през периода март - май, когато пролетното снеготопене се съчетава с падналите върху водосбора валежи. Пълноводието на реката е до края на м. юни, като след това започва лятно-есенното маловодие.

Средномногогодишният отток на р. Вит по данни от хидрометричните станции за периода 1981 г. – 2012 г. се изменя в границите от 2.790 m³/s при с. Черни Вит до 8.049 m³/s при с. Садовец и 10.813 m³/s към устието на реката при вливането ѝ в р. Дунав. За същия период средномногогодишният отток на р. Каменица при с. Бежаново (ХМС 21500) е 1.491 m³/s.

• Високи вълни. Наводнения.

Обработена е и анализирана информация за минали наводнения във водосбора на р. Вит. До края на 1999 г. общият брой на регистрираните

¹ Данните за температурата на въздуха са получени от наблюдения с живачни и спиртни термометри, поставени в метеорологични клетки на височина 2 m от земната повърхност

наводнения във водосбора е 14, докато за периода 01.01.2000 г. – 31.12.2019 г. са регистрирани 61 бр. наводнения.

II.4. Изводи:

1. За формиране на оттока във водосбора на р. Вит основна роля играят физикогеографските и климатични характеристики на района.

2. Релефът във водосбора е равнинен в Дунавската равнина, хълмисто-равнинен в Предбалкана и планински в горната част от водосбора. Най-горното течение на р. Вит се характеризира със стръмни брегове и много голям надлъжен наклон на реката, над 200 ‰, но към Тетевен достига 10 ‰. В долната си част р. Вит приема вече напълно равнинен характер – слаб наклон, ниска, хълмиста водосборна област.

3. Водосборната област е силно залесена, като незалесени части са изключително скалистите ридове.

4. От север на юг почвените типове във водосбора на р. Вит са алувиално-ливадни почви, черноземи - карбонатни и типични, излужени и оподзолени, сиви горски почви, кафяви горски, планинско – ливадни, а като азонален почвен тип са разпространени торфено-блатните почви.

5. Средната температура на въздуха за равнинната и полупланинска част от водосбора на р. Вит е 11.8 °С. За планинския дял от водосбора средната годишна температура на въздуха е около 6 °С, като в най-високо разположените планински части (с н.в. над 2000 m) средната температура на въздуха е около -1 °С.

6. Валежът се изменя в широки граници – от около 500-550 mm в Дунавската равнина до 1000 mm в планинската му част. Водосборът е с изявен максимум на екстремните валежи през лятото (над 60% от всички случаи са в периода Юни-Август) и минимум през зимата (около 3% в периода Февруари-Март).

7. Хидроложкият режим на р. Вит се характеризира с дъждовно-снежно подхранване в Дунавската равнина и Предбалкана и снежно-дъждовно подхранване в най-високо разположените части от водосбора. Реката има ясно изразен максимум през месеците май-юни, дължащ се на снеготопенето в Стара планина и дъждовете през този сезон. Минимумът е в периода август – септември.

8. В резултат на продължителни и интензивни валежи и формирани високи води във водосбора са регистрирани множество наводнения, като преобладаващият брой наводнения във водосбора през последното десетилетие са речни.

III. Избор на моделираща платформа. Създаване на основа за хидрологичния модел

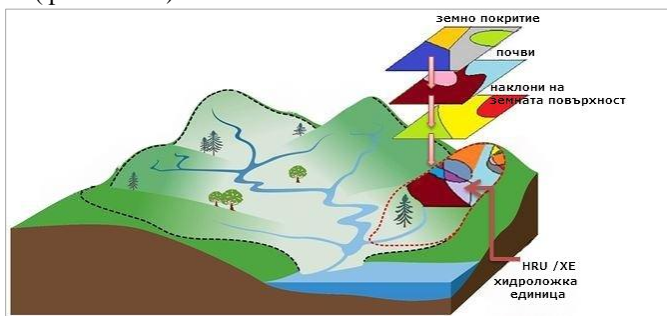
За изпълнение на поставените в дисертационния труд цели и задачи е използван хидроложкият полуразпределен физически базиран числен модел SWAT (Soil and Water Assessment Tool).

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.

III. 1. Представяне на модела SWAT

SWAT е физически базиран модел и моделира 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 (фиг. III.1.1).



фиг. III.1.1. Хидроложки единици

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.

III.1.1. Земна фаза на хидроложкия цикъл

SWAT симулира хидроложкия цикъл като използва уравнението на водния баланс:

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

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 подвodosбори 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 подвodosбора. Този подход повишава точността на модела и дава по-детайлно физическо представяне на водния баланс.

III.1.1.1. Метеорологични условия

Метеорологичните условия определят началните условия в уравнението на водния баланс.

III.1.1.2. Хидрология

Хидрологичните процеси, които представя SWAT са:

Инфилтрация

SWAT моделира количеството вода, което навлиза в почвения профил като разлика между количеството валеж и количеството повърхностен отток

Преразпределение

Компонентът за преразпределение в SWAT използва метода за рутиране на обемите (*storage routing technique*), за да моделира движението на вода в почвата.

Перколяция

С надвишаване на пределната полска влагоемност започва перколяция на вода към по-ниско разположения ненаситен почвен слой.

Евапотранспирация

В настоящата разработка 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.

Подповърхностен отток

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.

Повърхностен отток

SWAT симулира обема на повърхностния отток за всяка ХЕ като използва SCS Runoff Curve Number – метод на кривата на оттока. Кривата на оттока се представя с уравнението (SCS, 1972):

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{(R_{day} - I_a + S)} \quad (2)$$

където: Q_{surf} - повърхностен отток [mm];

R_{day} - валежна височина за деня [mm H₂O];

I_a - параметър, който отчита загубата на вода преди формирането на повърхностния отток [mm];

S - ретензионен параметър [mm].

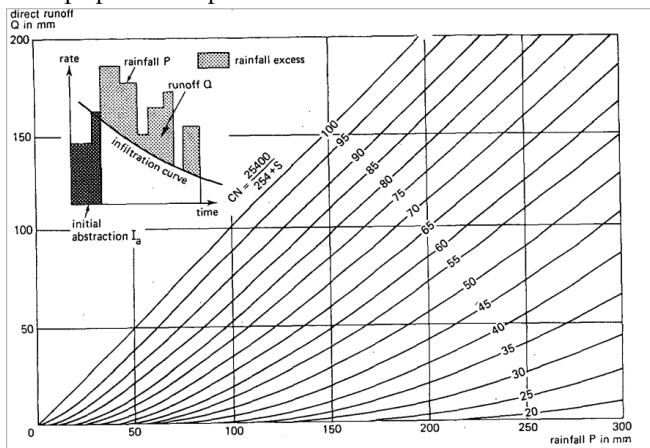
Ретензионният параметър се изменя пространствено в резултат на промени в почвите, земеползването, наклоните на терена и донякъде от

изменението на водното съдържание в почвите. Ретензионният параметър се изразява с уравнението:

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (3)$$

където CN е стойността на кривата на оттока за деня.

Решението на уравнение (5) за различни стойности на кривата на оттока е представено графично на фиг. III.1.1.2.1.



фиг. III.1.1.2.1. SCS Runoff Curve Number – метод на кривата на оттока

SWAT изчислява максималното водно количество в рамките на дадена валежна обстановка като използва широко разпространения „рационален метод“ (rational method) или т. нар. метод на пределната интензивност:

$$Q_{peak} = \frac{C * i * A}{3.6} \quad (4)$$

Подхранване от подземни води

SWAT разглежда подземните води във водосбора като две системи: плиткоразположен водоносен хоризонт, който отдава вода към речното легло и подхранва речния отток във водосбора, и дълбокоразположен водоносен хоризонт, който подхранва речните системи извън водосбора.

III.1.2. Фаза на движението

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-Sunge, който отчита физическите характеристики на речното легло:

$$Q_{j+1}^{n+1} = C_0 Q_j^{n+1} + C_1 Q_j^n + C_2 Q_{j+1}^n \quad (5)$$

III.2. Създаване на основа за хидрологичния модел

За определяне на физико-географските характеристики на водосбора (цифров модел на терена, земно покритие и почви) е използван графичният интерфейс ArcSWAT v.2012.10_2.19.

Хидрологичният отговор на метеорологичните условия във водосбора е моделиран посредством SWAT 2012, а калибрирането на модела е извършено с програмата SWAT-CUP 2009 v.4.3.1.

III.2.1. Пространствена дискретизация на водосбора на р. Вит

➤ Цифров модел на терена. Дефиниране на водосбора.

За моделирането на водосбора на р. Вит е използван цифров модел на терена (DEM) с големина на клетката 25 m, въз основа на който и чрез предварително определена прагова стойност на големина на водосбор в ArcSWAT, се генерира речната мрежа във водосбора. В случая, зададената прагова стойност от 24 km² е достатъчна, за да бъдат обхванати и представени значимите десет притока на р. Вит.

За определяне на Хидроложките единици, които са основа на моделираните процеси във водосбора са въведени хидрометричните станции във водосбора на р. Вит като контролни точки. Тези контролни точки са използвани за калибриране и валидиране на хидроложкия модел (фиг. III.2.1.1). Освен така определените контролни точки, във водосбора на р. Вит са определени и допълнителни точки, които са съобразени с предварителната оценка на риска от наводнения в Дунавски район за басейново управление 2022-2027 г.:



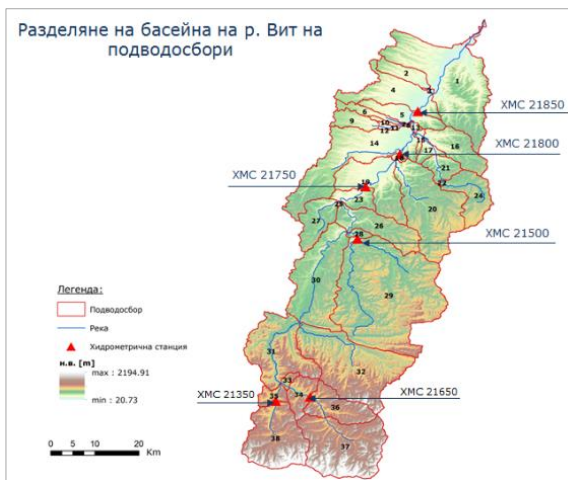
фиг. III.2.1.1. Схема на хидроложкия модел

- устието на р. Чернялка
- устието на реката, която протича през Горна и Долна Митрополия и е ляв приток на р. Вит
- вливането на двете безименни дерета, които протичат през с. Подем
- на р. Тученица в гр. Плевен;
- на р. Барата в с. Садовец.

С оглед тенденциите на промяна в земеползването и земното покритие, допълнителна точка е поставена и на р. Бели Вит при с. Рибарица. За да може да се оцени заплахата от аварийно преливане на язовирите при високи води и опасността от наводнения на населените места под тях, в модела са въведени допълнителни точки на язовирите Долна Митрополия, Кайлъка и Тотлебенов вал.

Към тези точки в модела са въведени техническите характеристики на съответните язовири, както и основни характеристики на режима на работата им (средната годишна норма на изпусканите водни количества).

При така избраният цифров модел на терена и определените контролни и допълнителни точки, във водосбора на р. Вит са дефинирани 38 подводосбора (фиг. III.2.1.2).



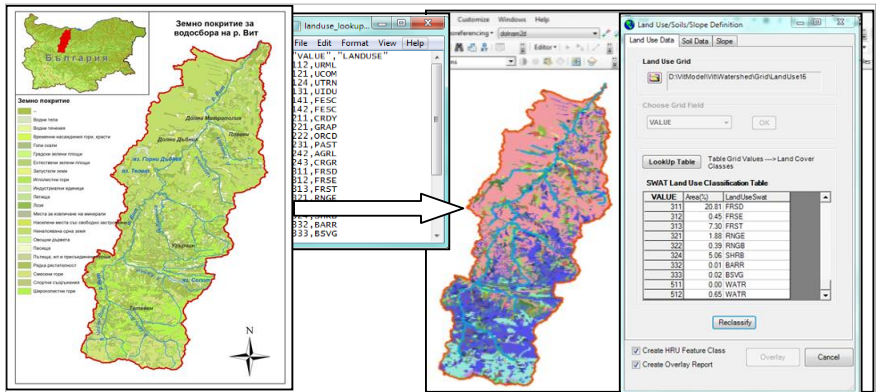
фиг. III.2.1.2. Карта на подводосборите в басейна на р. Вит

➤ Земно покритие

Информацията за земното покритие 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 и в речното корито и на формирането на оттока.

По информация от разработката CORINE LAND COVER (CLC) 2012 във водосбора на р. Вит са установени 23 броя класове на земното покритие, като най-разпространени са земеделските земи в долната и средна части на водосбора и широколистните и смесените гори в горната част на водосбора.

За да бъдат въведени характеристиките на различните класове земно покритие в базата данни на модела е необходимо информацията, получена въз основа на разработката CLC 2012 да бъде приведена в съответствие с информацията от базата данни на SWAT, която от своя страна е заимствана от Класификацията на земното покритие и почвите на САЩ (USDA ARS). В процеса на рекласификация на информацията за земното покритие във водосбора на р. Вит към наличните класове от земното покритие са присвоени съответните характеристики от базата данни на SWAT (фиг. III.2.1.3). Класовете на земното покритие във водосбора на р. Вит след рекласифициране са 20, като 50.12% от общата площ на водосбора е заета от земеделските земи, а 28.56% са горските площи.

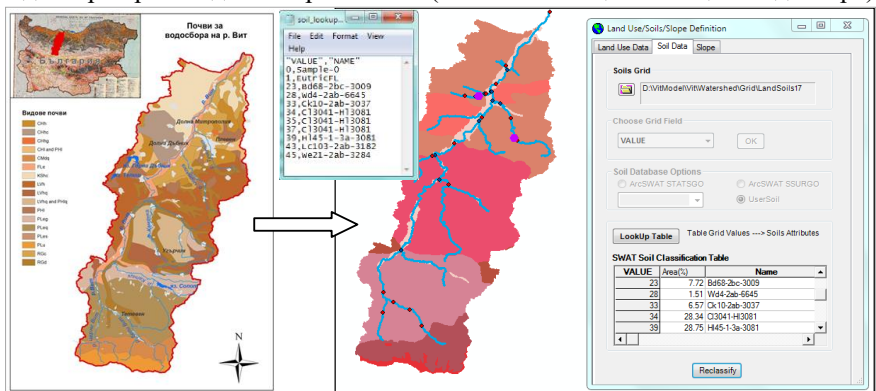


фиг. III.2.1.3. Рекласифициране на класовете на земното покритие

➤ Почви

За определяне на типовете почви във водосбора на р. Вит е използвана почвената карта на НР България, съставена през 1965 г. под ръководството на проф. В. Койнов и класификацията на Организацията по прехрана и земедели. Във водосбора са установени 18 бр. почвени типове. В горната част от водосбора почвените видове са светлосиви и кафяви горски, планинско-ливадни в най-високите части. В средната част от водосбора почвените типове са тъмносиви, сиви и светлосиви горски. Почвените типове в долната част на водосбора са карбонатни и типични черноземи.

Както информацията за земното покритие, така и информацията, получена на база почвената карта на НР България, е приведена в съответствие с информацията от базата данни на SWAT – фиг. III.2.1.4. Почвените класове във водосбора на р. Вит след рекласифициране са 8, като в долната част на водосбора преобладават черноземите (28.34% от общата площ на водосбора).



фиг. III.2.1.4. Рекласифициране на почвените класове

броя метеорологични станции разположени във водосбора. За по-добро представяне на метеорологичните параметри са използвани и 13 метеорологични станции, намиращи се извън него.

Предвид неравномерното и недостатъчно разпределение на метеорологичните станции с данни за температура на въздуха във водосбора (фиг. III.2.2.1.1), в модела е включен анализ на изменението на температурата на въздуха във височина.



➤ Вертикален температурен градиент

Определена е зависимостта на фиг. III.2.2.1.1. Метеорологични средногодишната температура на станции във водосбора на р. Вит въздуха от надморската височина за периодите 1971 г.–2000 г., 1981 г.–2010 г., 1991 г.–2010 г. и 2001 г.–2010 г. и са изчислени градиентите на средногодишната температура на въздуха [$^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$] за водосбора на р. Вит, съответно 0.52, 0.52, 0.53 и 0.52.

➤ 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.

III.2.2.2. Хидрологична информация

Моделът за водосбора на р. Вит е разработен с данни за измерени водни количества за периода 01.07.2015 г.–31.12.2020 г от 6 хидрометрични станции във водосбора (фиг. III.2.2.2), Три от хидрометричните станции са разположени на основната река, а останалите три на притоците ѝ Черни Вит, Бели Вит и Каменица.



фиг. III.2.2.2. Хидрометрични станции във водосбора на р. Вит

III.3. Изводи

Избирането на конкретен хидроложки модел зависи от особеностите на речния басейн, както и от целите, за които ще бъде използван моделът.

SWAT е утвърден в световната практика хидрологичен модел с широк спектър на приложение и е водещ инструмент в изследването на хидроложкия режим и прогнозиране на речния отток в ненаблюдавани водосбори, изследване на влиянието на климатичните промени и антропогенната дейност.

Като физически базиран модел, параметрите в SWAT имат съответното физическо значение и информация за тях може да бъде получена от различни източници на данни: цифров модел на терена, земно покритие и почви.

Моделът работи в ГИС-среда и параметрите му могат да бъдат извлечени, а резултатите от симулациите - анализирани и визуализирани с помощта на съответния графичен интерфейс.

Водосбори без метеорологичен и хидрологичен мониторинг могат да бъдат моделирани със SWAT.

IV. Прилагане на SWAT за водосбора на р. Вит

SWAT е приложен за водосбора на р. Вит с хидрометеорологична информация със стъпка 24 h за периода 01.07.2015 г.–31.12.2020 г.

Метеорологичните данни за периода 01.07.2015 г.–01.01.2017 г. са използвани за подгряване (warm-up) на модела. Включването на подгряващ период е необходимо, за да бъде стабилизирания модела и да бъдат коректно възпроизведени началните условия във водосбора .

В процеса на калибриране целта е да бъдат определени и рedefинирани тези параметри, които позволяват по-добро симулиране на наблюдаваните водни количества. 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.

В дисертационния труд оценката за представянето на калибрирания модел е направена съгласно насоките за оценка на хидроложки модел според *Moriasi et al, 2007* – табл. IV.1. Препоръчва се за оценка на работата на модела да се използват две количествени оценки – коефициент на ефективност на Наш-Сътклиф (NSE) и процентно отклонение (PBIAS) в допълнение към графичните способности.

табл. IV.1 Статистически критерии за ефективността на модела

Оценка на работата на модела	NSE		PBIAS
	дневна стъпка	месечна стъпка	дневна и месечна стъпка
Много добър	$0.65 < NSE \leq 1.00$	$0.75 < NSE \leq 1.00$	$PBIAS \leq \pm 10$
Добър	$0.54 < NSE \leq 0.65$	$0.65 < NSE \leq 0.75$	$\pm 10 \leq PBIAS \leq \pm 15$
Задоволителен	$0.50 < NSE \leq 0.54$	$0.50 < NSE \leq 0.65$	$\pm 15 \leq PBIAS \leq \pm 25$
Незадоволителен	$NSE \leq 0.50$	$NSE \leq 0.50$	$PBIAS \geq \pm 25$

Към горепосочените статистически критерии за оценка на работата на модела, е включен и коефициентът на детерминация (R^2), тъй като в хидроложното моделиране той е основна количествена оценка за сравняване на симулирани и наблюдавани стойности на водните количества.

За да се оцени ефективността му, калибрираният модел е валидиран с данни за измерени водни количества за период различен от периода за калибриране. В процеса на валидиране не се извършва допълнителна параметризация на модела. Критериите за точност на резултатите от валидирането са същите като тези при калибрирането на модела.

IV.1. Резултати от моделиране с първоначално приети от подложната информация физически базирани параметри

Като общоприета практика ефективността на хидроложните модели се оценява като се извършват симулации с голяма времева стъпка (месечна, сезонна или годишна). По този начин, с по-малък изчислителен ресурс и по-кратко време за моделиране, могат да бъдат оценени надеждността на данните за водните количества, пространствената информация и нейната резолюция (земно покритие, почви).

На фигури IV.1.1 – IV.1.6 са представени ходографите на симулираните и измерени водни количества с месечна стъпка на модела.



фиг. IV.1.1. Първоначален резултат от моделиране на водното количество при ХМС 21350 – р. Черни Вит при с. Черни Вит, месечна стъпка на модела



фиг. IV.1.2. Първоначален резултат от моделиране на водното количество при ХМС 21650 – р. Бели Вит при гр. Тетевен, месечна стъпка на модела



фиг. IV.1.3. Първоначален резултат от моделиране на водното количество при XMC 21500 – р. Каменица при с. Бежаново, месечна стъпка на модела



фиг. IV.1.4. Първоначален резултат от моделиране на водното количество при XMC 21750 – р. Вит при с. Крушовица, месечна стъпка



фиг. IV.1.5. Първоначален резултат от моделиране на водното количество при XMC 21800 – р. Вит при с. Търнене, месечна стъпка



фиг. IV.1.6. Първоначален резултат от моделиране на водното количество при XMC 21850 – р. Вит при с. Биволаре, месечни стойности

В табл. IV.1.1. са представени и статистически оценки на резултатите от моделирането с първоначално приетите физически базирани параметри. табл. IV.1.1. Статистически оценки на резултатите от моделирането на средномесечните водни количества с първоначално приетите параметри

Параметър/ Станция	ХМС 21350	ХМС 21650	ХМС 21500	ХМС 21750	ХМС 21800	ХМС 21850
*Qизм., [m ³ /s]	2.40	3.74	2.81	12.12	15.00	14.04
*Qсим., [m ³ /s]	1.91	3.59	2.14	13.30	13.41	14.06
NSE	0.23	0.48	0.51	0.80	0.84	0.84
PBIAS	20	12	24	-10	11	0

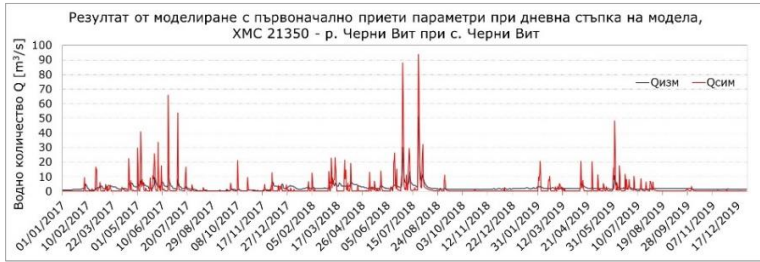
Графичното представяне на резултатите от моделирането на средномесечните водни количества с първоначално приетите физически базирани параметри показва много добро описване на високите води.

В средната и долната части на водосбора статистическите оценки показват много добра работа на модела – и при трите станции (#21750, #21800 и #21850) NSE е 0.8 и над 0.8. NSE е задоволителен като резултат за р. Каменица (0.51). Незадоволителни са резултатите от модела за станциите във високите части на водосбора: NSE е 0.23 при ХМС 21350 – Черни Вит и 0.48 при ХМС 21650 – Тетевен.

Високите води са много добре симулирани при всички мониторингови точки. При почти всички хидрометрични станции симулираните водни количества са занижени при ниските и средните води. Изключение е ХМС 21750 – с. Крушовица, където моделираните водни количества са завишени при високите и средните води и са занижени при ниските води, както се вижда и от резултатите за PBIAS.

Добрите статистически оценки на първоначалните резултати от моделирането на средномесечните водни количества с месечна стъпка показват добра сходимост между симулираните и измерените водни количества, както и надеждност на параметрите, извлечени от пространствените данни, което дава основания да се премине към калибрирането на модела с дневна стъпка по време.

SWAT е приложен за водосбора на р. Вит с 24-часова стъпка на модела като резултатите за избрания период на калибриране за шестте хидрометрични станции във водосбора на р. Вит са представени на фигури IV.1.7-IV.1.12.



фиг. IV.1.7 Първоначален резултат от моделиране на водното количество при ХМС 21350 – р. Черни Вит при с. Черни Вит; стъпка на модела 24h



фиг. IV.1.8 Първоначален резултат от моделиране на водното количество при ХМС 21360 – р. Бели Вит при гр. Тетевен; стъпка на модела 24h



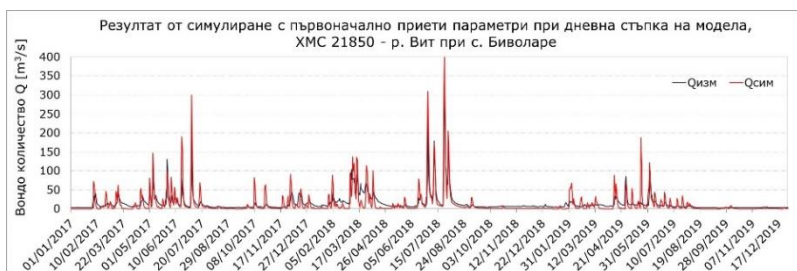
фиг. IV.1.9 Първоначален резултат от моделиране на водното количество при ХМС 21500 – р. Каменица при с. Бежаново; стъпка на модела 24h



фиг. IV.1.10 Първоначален резултат от моделиране на водното количество при ХМС 21750 – р. Вит при с. Крушовица; стъпка на модела 24h



фиг. IV.1.11. Първоначален резултат от моделиране на водното количество при ХМС 21800 – р. Вит при с. Търнене; стъпка на модела 24h



фиг IV.1.12. Първоначален резултат от моделиране на водното количество при ХМС 21850 – р. Вит при с. Биволаре; стъпка на модела 24h

В табл. IV.1.2 са представени и статистическите оценки на резултатите от моделирането на среднодневните водни количества с първоначално приетите параметри.

табл. IV.1.2. Статистически оценки на резултатите от моделирането на среднодневните водни количества с първоначално приетите физически базирани параметри

Параметър / Станция	ХМС 21350	ХМС 21650	ХМС 21500	ХМС 21750	ХМС 21800	ХМС 21850
Qизм., [m ³ /s]	2.40	3.74	2.81	12.12	15.02	14.06
Qсим., [m ³ /s]	1.91	3.58	2.14	13.27	13.38	14.04
NSE	-2.27	-2.68	-0.14	0.064	0.28	0.34
PBIAS, %	21	4	24	-9	11	1

Резултатите показват добро описване на високите вълни, като при всички станции пиковите им са завишени.

Коефициентът на ефективност на Наш-Сътклиф (NSE) е незадоволителен за високите части от водосбора: -2.27 при ХМС 21350 (р. Черни Вит при с. Черни Вит) и -2.68 при ХМС 21650 (р. Бели Вит при гр. Тетевен), както и за притока, р. Каменица (-0.14). В средната и долната част на водосбора стойностите на NSE показват по-добри, но все пак незадоволителни резултати – от 0.06 до 0.34.

При почти всички мониторингови точки моделираните водни количества са занижени при ниските и средните води. Изключение е ХМС 21750 – с. Крушовица, където, както и при симулацията с месечна стъпка, моделираните водни количества са завишени при средните и високите води и са занижени при ниските, което се вижда и от резултатите за PBIAS.

IV.2. Калибриране на модела. Анализ на чувствителността на параметрите и оценка на неточностите в работата на модела.

Моделът е калибриран с помощта на приложението SWAT-Cup с данни за измерени водни количества от всички шест хидрометрични станции във водосбора на р. Вит за периода 01.01.2017 г. – 31.12.2019 г. Калибрирането е проведено в съответствие с предложения от Abbaspour et. al протокол за калибриране. 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, разработено специално за модела SWAT.

IV.2.1. Калибриране на параметрите

В оперативната работа при изготвяне на хидрологичните прогнози и издаване на предупреждения приоритетно значение има прогнозирането на високи води и опасността от наводнения. Фокусът при калибрирането на модела е симулирането на високи вълни.

Параметрите в модела, които описват речния отток са 26. В разглежданата литература, на база голям брой проведени хидроложки изследвания, е установено, че 12 от параметрите имат най-голямо значение при получаването на добри резултати. В т. IV.2.2 са представени 10 от тях, като останалите два – коефициент на грапавина по Манинг (Ch_N) и коефициент на корекция при изпарение от почви (ESCO) са предварително дефинирани.

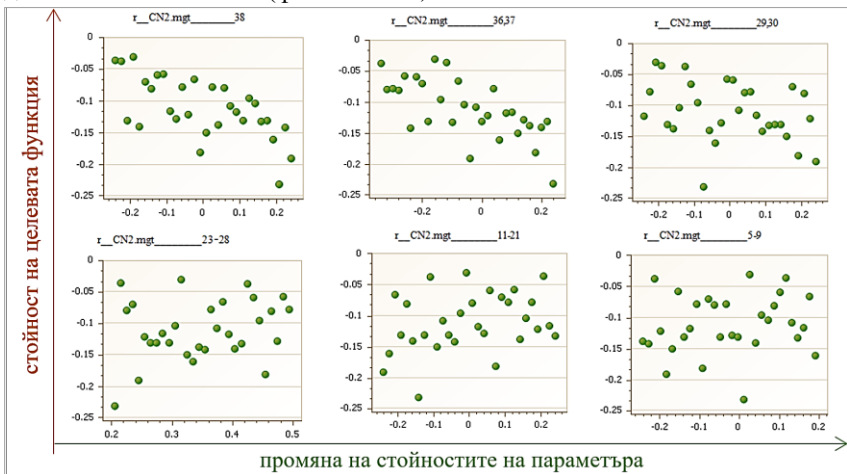
Първа стъпка в калибрирането на модела е разделянето на височинни зони на подводосборите в планинската и припланинската части от водосбора, за да бъде отчетено орографското влияние върху температурите и валежа - надморската височина в тези подводосбори се изменя в широки граници – от 363 m до 2194 m. . Процесите, които се моделират отделно за всеки един от тези подводосбори са натрупването на снежна покривка, сублимацията и снеготопенето. За всеки един от подводосборите в планинската област е въведен определеният градиент на температурата на въздуха ($0.52\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$).

По подразбиране в модела е заложен коефициент на грапавина по Манинг 0.14 за речното корито. Коефициентът е рedefиниран и за основното течение и за притоците като новите стойности варират от 0.035 до 0.06 в зависимост от характеристиките на съответния речен участък: в най-високите части на водосбора – за горното течение на р. Черни Вит и за р. Бели Вит над. с. Рибарица коефициентът на грапавина е определен съответно на 0.05 и 0.06.

IV.2.2. Анализ на чувствителността на параметрите

На фигури IV.2.2.1 - IV.2.2.10 е представена графичната зависимост между промяната в стойността на параметрите за хидроложкия модел на р. Вит и стойностите на целевата функция.

Калибрирането на модела започва с оптимизацията на параметъра Cn2 във високите части на водосбора. Кривата на оттока характеризира оттокообразуващата способност на всеки един подводосбор в зависимост от земното покритие и почвените характеристики. Високите стойности на Cn2 са индикатор за трансформирането на голяма част от валежа в повърхностен отток. Параметърът е чувствителен за подводосборите в горната част (#38, #36) и за притока (подводосбор #29), като намаляването на стойността му води до по-висок резултат на целевата функция (фиг. IV.2.2.1). С калибрирането на Cn2 в подводосборите от горната част чувствителността му за подводосборите в долната част намалява (фиг. IV.2.2.1).

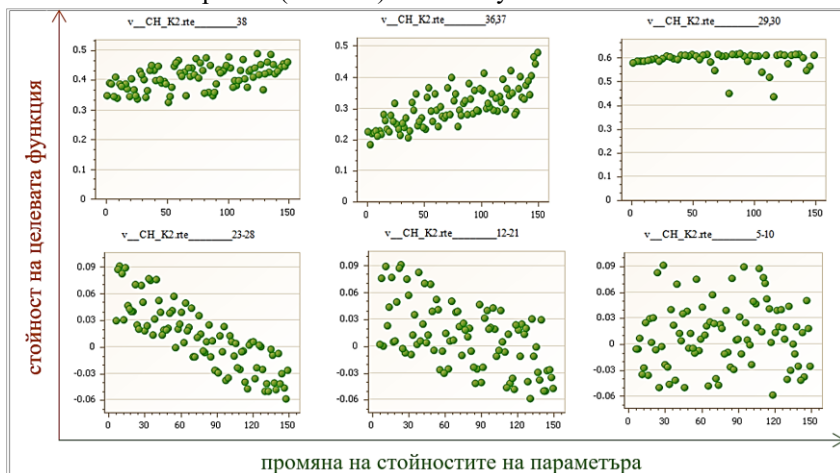


фиг. IV.2.2.1. Графична зависимост между изменението на стойността на параметъра Cn2 и резултата на целевата функция

SURLAG дава възможност чрез определяне на времето на дотичане да се регулира количеството на повърхностния отток, което достига речното корито. Направените итерации показват, че параметърът не е чувствителен и изменението му не влияе на стойността на целевата функция, затова и последващи изследвания с него не са провеждани.

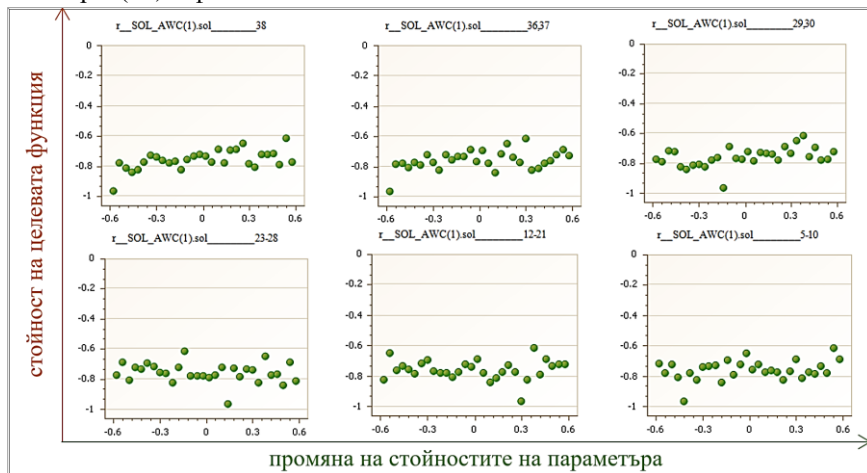
По-високите стойности на ефективната хидравлична проводимост на алувия в основното течение (Ch_K2) водят до увеличаване на инфилтрацията и намаляване на повърхностния отток. Резултатът на целевата функция (фиг. IV.2.2.2) при подводосборите в средната и високите части (#12-#28 и #36-#38) се подобрява с увеличаване на стойността на Ch_K2. Оптимизацията на параметъра за водосбора на р. Каменица (#29 и #30) показва несъществено

изменение на резултата на целевата функция. За подводосборите в равнинната част на басейна на р. Вит (#5 - #10) той е нечувствителен.



фиг. IV.2.2.2. Графична зависимост между изменението на стойността на параметъра Ch_K2 и резултата на целевата функция

Sol_Awc е показател за количеството вода, което е на разположение на растенията. Симулациите показват, че изменение на стойността на Sol_Awc води до промяна на резултата на целевата функция при високоразположените подводосбори ((#36-#38), водосбора на р. Каменица (#29) и към ХМС 21850 – Биволаре (#5) – фиг. IV.2.2.3.

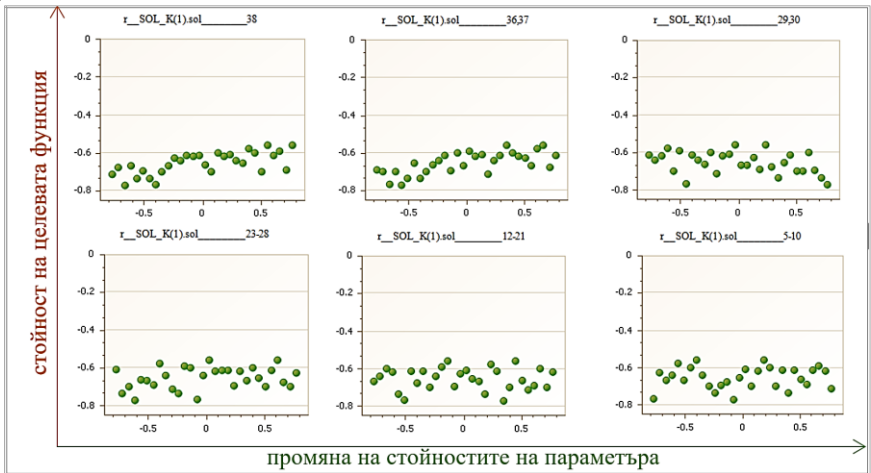


фиг. IV.2.2.3. Графична зависимост между изменението на стойността на параметъра Sol_Awc и резултата на целевата функция

Alpha_Bf е индекс на изменението на подповърхностния отток в зависимост от подхранването. Определя се като отношението между оттока от подземни води в настоящ момент към оттока от подземни води за предходния ден. Стойността на параметъра зависи и от класа на земното покритие и от почвените характеристики. По-ниската стойност на параметъра показва по-бавен отговор на подземния отток към метеорологичните условия и намаляване на оттока от подземни води.

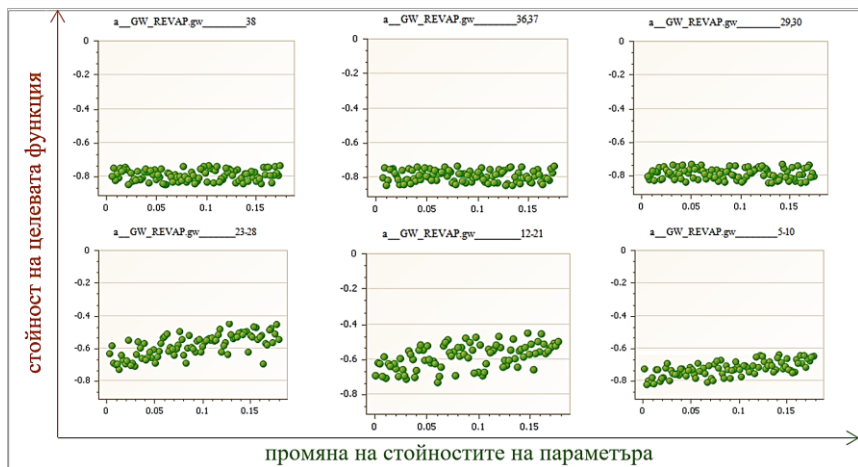
Наситената хидравлична проводимост на почвата, Sol_K [mm/hr], описва скоростта на водния поток в почвата като функция на хидравличния градиент и е индикатор за способността за движение на вода във водонаситена почва.

Представените на фиг. IV.2.2.4 резултати от симулациите показват, че параметърът е чувствителен за водосборите на реките Бели Вит (#36, #37), Черни Вит (#38) и Каменица ((#29, #30). Параметърът оказва несъществено влияние върху стойностите на целевата функция при подводосборите в равнинната част на басейна.



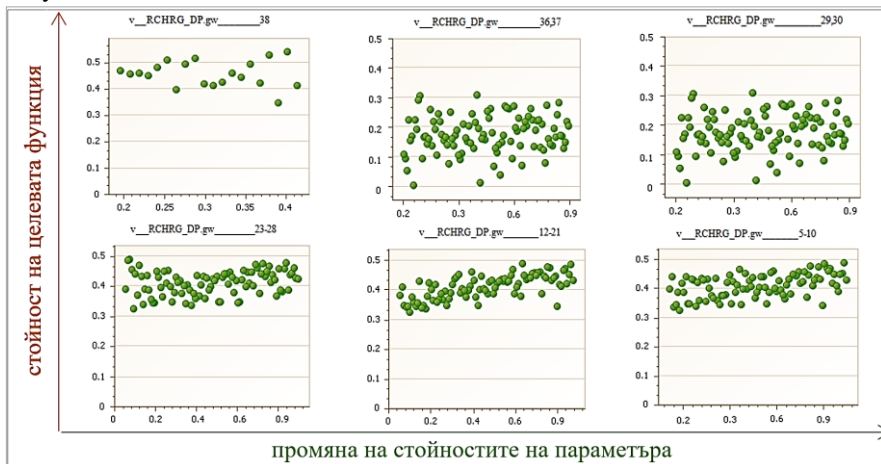
фиг. IV.2.2.4. Графична зависимост между изменението на стойността на параметъра Sol_K и резултата на целевата функция

Gw_Revap: подхранване на кореновия пласт от плиткия водоносен хоризонт. Чрез него се описва движението на вода от плитко разположения водоносен хоризонт към почвения слой над него. Резултатът на целевата функция при по-ниско разположените подводосбори (#5-#28) се подобрява с увеличаване на стойността на Gw_Revap (фиг. IV.2.2.5). Параметърът е нечувствителен за подводосборите във високите части на басейна на р. Вит (#36-#38) и за водосбора на р. Каменица (#29, #30) като промяна в стойността му не води до промяна в резултата на целевата функция за тях.



фиг. IV.2.2.5 Графична зависимост между изменението на стойността на параметъра Gw_Revap и резултата на целевата функция

Rchrg_Dp: перколяция от кореновия пласт към дълбокия водоносен хоризонт. Rchrg_Dp определя каква част от перколяцията от коренообитаемият почвен слой подхранва дълбоко залегналия водоносен хоризонт. Резултатът на целевата функция при по-ниско разположените подводосбори (#5-#28) се подобрява с увеличаване на стойността на Rchrg_Dp (фиг. IV.2.2.6). Оптимизацията на параметъра за водосбора на р. Каменица (#29, #30) показва несъществено изменение на резултата на целевата функция, а за подводосборите във високите части на басейна на р. Вит (#36 - #38) той е нечувствителен.



фиг. IV.2.2.6. Графична зависимост между изменението на стойността на параметъра Rchrg_Dp и резултата на целевата функция

Параметърът Gwqmn задава гранична стойност на дълбочината на водата в плитко разположеният водоносен хоризонт. Направените итерации с изменение на стойността на Gwqmn показват, че параметърът не е чувствителен и изменението му не влияе на стойността на целевата функция.

Чрез параметъра Gw_Delay се описва движението на вода през най-ниско разположеният почвен слой, която навлизайки и преминавайки през вадозната зона подхранва плитко разположеният водоносен хоризонт. Направените итерации с изменение на стойността на Gw_Delay показват, че параметърът не е чувствителен и изменението му не влияе на стойността на целевата функция.

Така проведените анализи на разглежданите параметри са основата, върху която са извършени по-нататъшни симулации и итерации в процеса на калибриране. Окончателният брой на параметрите и съответните стойности, с които е калибриран хидроложкият модел, са представени в табл. IV.2.2.1.

табл.IV.2.2.1. Окончателен брой и стойности на параметрите, с които е калибриран хидроложкият модел

	Гранични ст-ти	Окончателна стойност / ниво подводосбор					
		5 - 10	12 - 21	23 - 28	29 - 30	36 - 37	38
Cn2	-	-15%	-20%	-20%	-15%	-30%	-30%
Ch_K2	-	-	-15%	-10%	-15%	+15%	+15%
Sol_AWC	-	+10%	+10%	+30%	+8%	-30%	-20%
Sol_K	-	-	-	+20%	-	+35%	+30%
Gw_Revap	[0.02 - 0.2]	0.2	0.2	0.2	-	-	-
Rchrg_Dp	[0 - 1]	0.08	0.15	0.2	0.2	0	0
Alpha_Bf	[0 - 1]	0.6	1	1	-	-	-

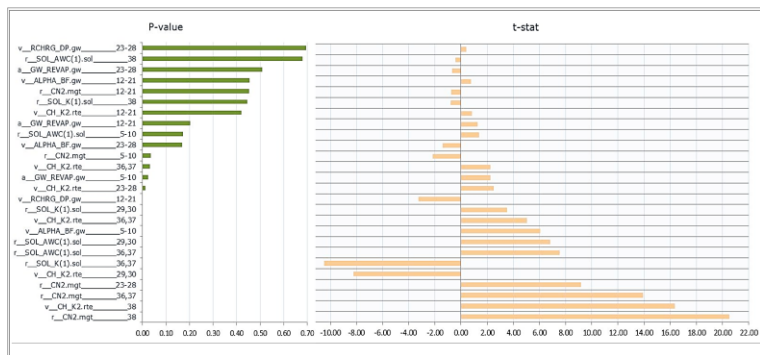
За да се оценят значимостта на параметрите, с които е калибриран модела и взаимодействието им по отношение на крайния резултат, в настоящата разработка е разгледан и общият анализ на чувствителността на параметрите (фиг. IV.2.2.7).

Чувствителността на всеки един параметър се оценява с помощта на t-test (t-критерий), който представя степента на чувствителност на параметъра. По-големите абсолютни стойности показват по-голяма чувствителност.

Значимостта на всеки един параметър се оценява с критерия P-value (P-стойност), който е показател за значимостта на чувствителността. Стойности по-малки от 0.05 определят параметъра като чувствителен.

С най-голямо значение за резултатите от хидроложкото моделиране са параметрите на повърхностния отток (Cn2 и Ch_K2) и почвените параметри (SOL_AWC и SOL_K). Тези параметри са най-чувствителни за високо разположените подводосбори (#36 - #38) и за водосбора на р. Каменица (с изключение на наситената хидравлична проводимост на почвата). За подводосборите в по-ниските части от басейна на р. Вит (#12-#28) освен параметрите на повърхностния отток, чувствителен е и параметърът

Rchrg_Dp. За подводосборите в равнинната част ((#5-#10) чувствителни са два от параметрите на поземния отток - Alpha_Bf и Gw_Revap.



фиг. IV.2.2.7. Общ анализ на чувствителността на параметрите на хидроложкия модел

IV.3. Резултати от симулации с калибриран модел

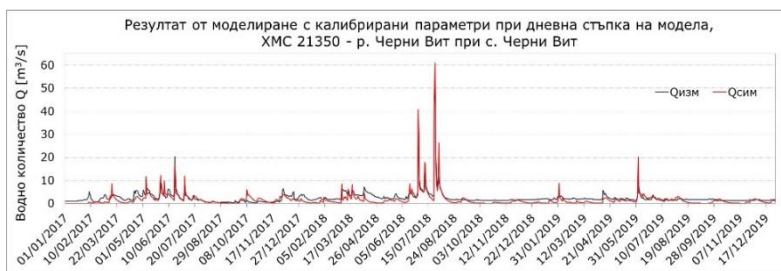
Хидроложният модел за водосбора на р. Вит е калибриран до достигане на оптимална стойност на целевата функция. Статистическите оценки на резултатите от симулациите с калибрирания хидроложки модел за периода 01.07.2017 – 31.12.2019 са представени в табл. IV.3.1. Оценката за ефективността на работата на модела е направена в съответствие с представените в настоящата глава насоки (табл. IV.1).

табл. IV.3.1. Статистически оценки на резултатите от симулации с калибрирани параметри

Станция / Критерий	NSE		PBIAS	
	дневна стъпка	месечна стъпка	дневна стъпка	месечна стъпка
21350	0.61	0.64	33	1
21650	0.39	0.62	16	2
21500	0.43	0.75	28	20
21750	0.77	0.79	-3	-10
21800	0.76	0.84	18	11
21850	0.81	0.84	7	2

Статистическите оценки от симулациите с калибрирания модел както със стъпка 24-h, така и с месечни стойности, го определят като „добър“ за подводосбора на р. Черни Вит (XMC 21350).

Графичното представяне на резултатите за симулираните водни количества с дневна стъпка е представено на фиг. IV.3.1.



фиг. IV.3.1. Резултат от симулиране на водното количество при ХМС 21350 – р. Черни Вит при с. Черни Вит с калибриран модел; стъпка на модела 24h

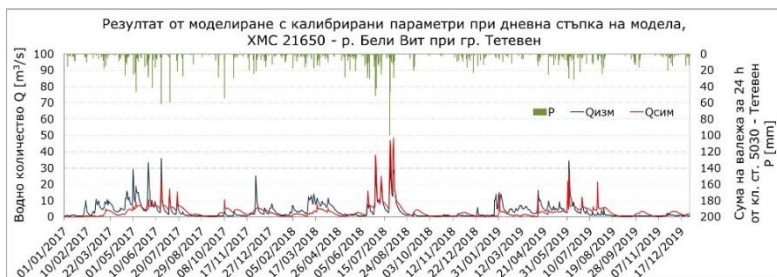
Извод: Статистическите оценки и графичното представяне на резултатите от симулациите показват, че моделът симулира много добре процеса „валеж-отток“ в подводосбора (#38, ХМС 21350). Формите на хидрографите на симулираните и измерените ежедневни водни количества имат много добра сходимост като високите и средните води са добре моделирани.

Статистическите оценки от симулациите с калибрирания модел с месечни стойности го определят като „добър“ за подводосбора на р. Бели Вит (ХМС 21650), докато със стъпка 24h моделът е „задоволителен“.

Графичното представяне на резултатите за симулираните водни количества с месечна и дневна стъпка на модела са представени съответно на фиг. IV.3.2. и фиг. IV.3.3.



фиг. IV.3.2. Резултат от симулиране на водното количество при ХМС 21650 – р.Бели Вит при гр. Тетевен с калибриран модел; месечна стъпка



фиг. IV.3.3. Резултат от симулиране на водното количество при ХМС 21650 – р. Бели Вит при гр. Тетевен с калибриран модел; стъпка на модела 24h

Извод: Статистическите оценки и графичното представяне на резултатите от симулациите с месечна стъпка показват, че моделът симулира много добре процеса „валеж-отток“ в подводосбора (#36, ХМС 21650).

Графично представените резултати от симулациите с дневна стъпка показват, че моделът описва много добре както по форма, така и по пикове на водното количество летните високи вълни, докато зимните и пролетните високи вълни са подценени. За водосбора на р. Вит, както и за реките в Дунавския водосбор, са характерни екстремни хидрометеорологични явления през летния сезон, които са причина за възникване на наводнения (гл. II). Затова и много добрата сходимост на формите на хидрографите на симулираните и измерените ежедневни водни количества в периодите на летните максимуми следва да бъде взета предвид при крайната оценка за ефективността на модела.

Статистическите оценки от симулациите с калибрирания модел с месечна стъпка го определят като „много добър“ за подводосбора на р. Каменица (ХМС 21650), докато със стъпка 24h моделът е „задоволителен“. Графичното представяне на резултатите за симулираните водни количества с месечна и дневна стъпка на модела при ХМС 21500 – р. Каменица при с. Бежаново са представени съответно на фиг. IV.3.4. и фиг. IV.3.5.



фиг. IV.3.4 Резултат от симулиране на водното количество при ХМС 21500 – р.Каменица при с. Бежаново с калибриран модел; месечна стъпка

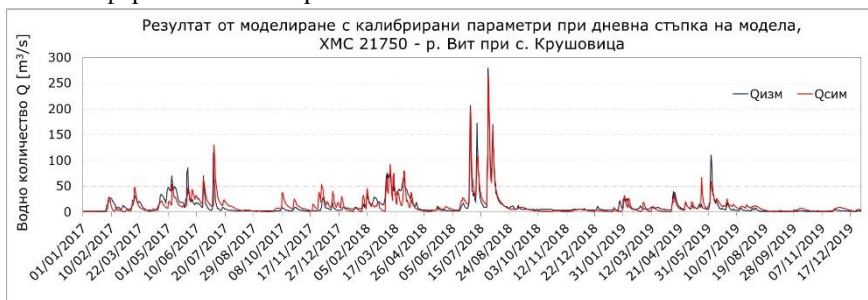


фиг. IV.3.5 Резултат от симулиране на водното количество при ХМС 21500 – р.Каменица при с. Бежаново с калибриран модел; стъпка на модела 24h

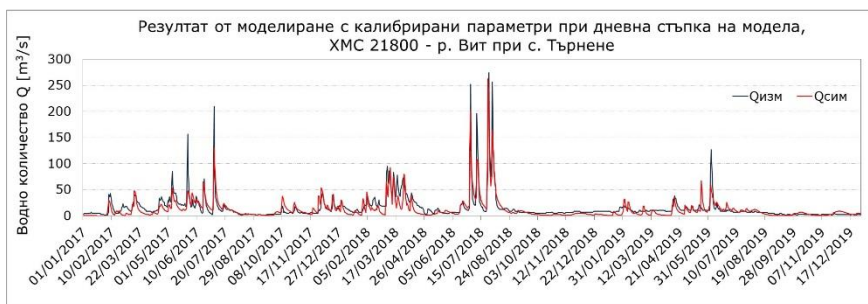
Извод: Статистическите оценки и графичното представяне на резултатите от симулациите с месечна стъпка показват, че моделът симулира много добре процеса „валеж-отток“ в подводосбора (#29).

Формите на хидрографите на симулираните и измерените ежедневни водни количества имат добра сходимост като средните и ниските води са добре моделирани, докато високите вълни са подценени. Моделът със стъпка 24h симулира добре времето на настъпване на пиковете на високите вълни, но не и формата на пика.

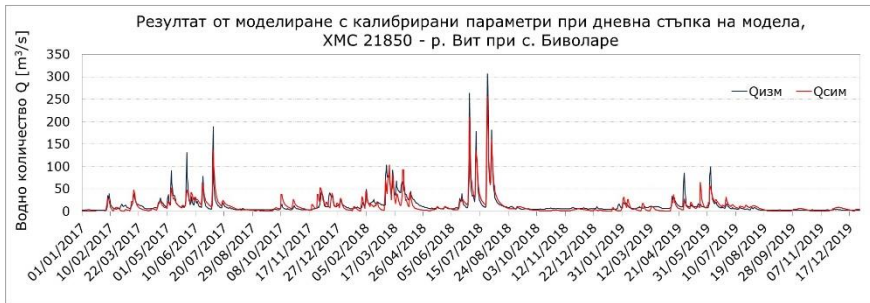
За подводосборите в по-ниските и равнинните части от басейна на р. Вит (# 23, #18 и #5) резултатите от симулациите с калибрирани параметри както с месечна, така и с дневна стъпка на модела, го определят като „много добър“. От графично представените резултати на симулираните среднодневни водни количества (фигури IV.3.6 - IV.3.8) и при трите контролни точки (ХМС 21750, ХМС 21800 и ХМС 21850) се вижда, че моделът описва много добре средните и високите води. Високите вълни също са симулирани много добре, както по форма така и по време на настъпване на пика.



фиг. IV.3.6. Резултат от симулиране на водното количество при ХМС 21750 – р. Вит при с. Крушовица с калибриран модел; стъпка на модела 24h



фиг. IV.3.7. Резултат от симулиране на водното количество при ХМС 21800 – р. Вит при с. Търнене с калибриран модел; стъпка на модела 24h



фиг. IV.3.8. Резултат от симулиране на водното количество при ХМС 21850 – р. Вит при с. Биволаре с калибриран модел; стъпка на модела 24h

IV.4. Валидиране на модела

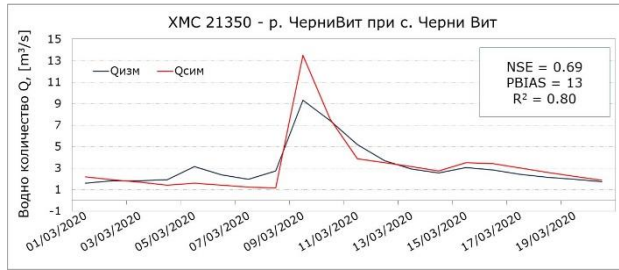
Хидроложкият модел за водосбора на р. Вит е калибриран по отношение на високи води, затова при валидирането му са използвани статистически критерии за оценка на работата на модела за определени периоди с регистрирани преминали високи вълни през 2020 г. (избраният период на валидиране).

След анализ на хидрографите при хидрометричните станции във водосбора на р. Вит за 2020 г. (фиг. IV.4.1) за валидиране на хидроложкия модел е избран период с преминала висока вълна и регистрирани максимални водни количества при всички хидрометрични станции във водосбора (01.03.2020 г.–20.03.2020 г.).

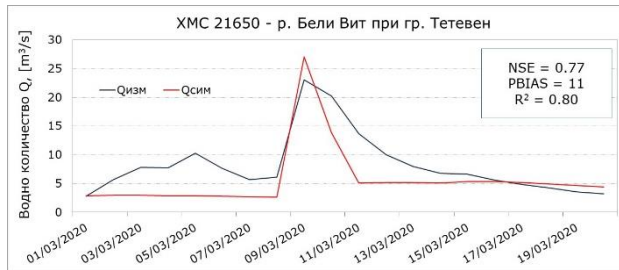


фиг. IV.4.1. Ходографи на ежедневните водни количества във водосбора на р. Вит за 2020 г.

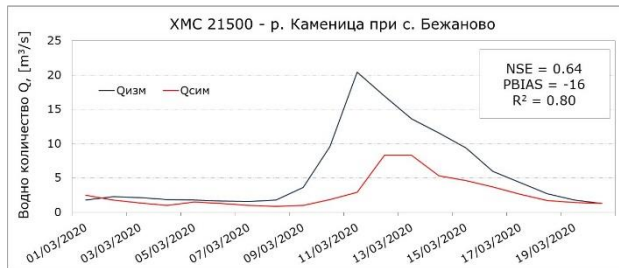
На фигури IV.4.2- IV.4.7 са представени резултатите от симулиране на водното количество за периода 01.03.2020 г.–20.03.2020 г. при всички хидрометрични станции във водосбора.



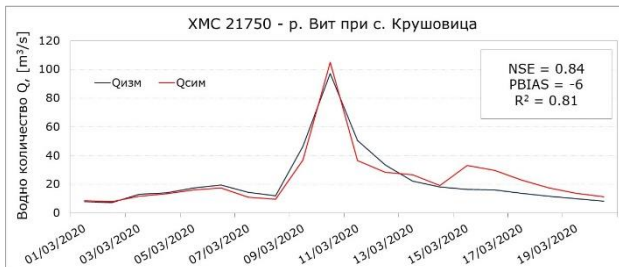
фиг. IV.4.2. Резултат от симулиране на водното количество при ХМС 21350 – р. Черни Вит при с. Черни Вит с валидиран модел; стъпка на модела 24h



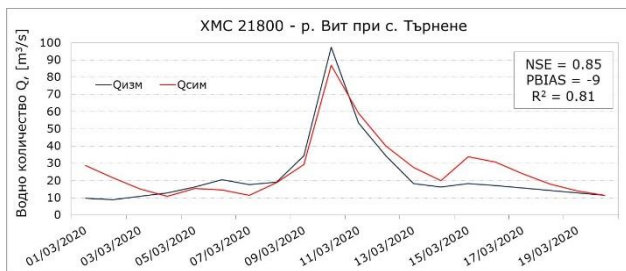
фиг. IV.4.3. Резултат от симулиране на водното количество при ХМС 21650 – р. Бели Вит при гр. Тетевен с валидиран модел; стъпка на модела 24h



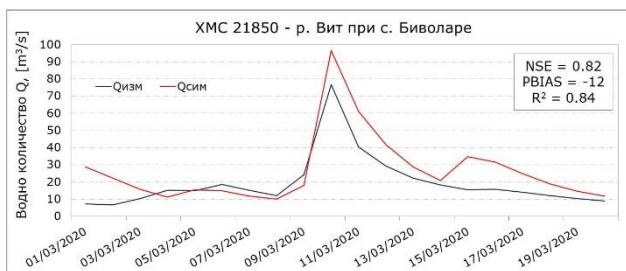
фиг. IV.4.4. Резултат от симулиране на водното количество при ХМС 21500 – р. Каменица при с. Бежаново с валидиран модел; стъпка на модела 24h



фиг. IV.4.5. Резултат от симулиране на водното количество при ХМС 21750 – р. Вит при с. Крушовица с валидиран модел; стъпка на модела 24h



фиг. IV.4.6. Резултат от симулиране на водното количество при ХМС 21800 – р. Вит при с. Търнене с валидиран модел; стъпка на модела 24h



фиг. IV.4.7. Резултат от симулиране на водното количество при ХМС 21850 – р. Вит при с. Биволаре с валидиран модел; стъпка на модела 24h

Извод: При всички хидрометрични станции високата вълна е много добре симулирана с модела, както по отношение на пика, така и по отношение на времето на настъпване на пика, което се потвърждава и от добрите статистически резултати. Симулираният пик на 09.03.2020 г. към ХМС 21650 – р. Бели Вит при гр. Тетевен е 27.110 m³/s и се доближава до стойността (25.390 m³/s) регистрирана от автоматичната станция. Симулираният пик на 10.03.2020 г. към ХМС 21750 – р. Вит при с. Крушовица е 104.900 m³/s и се доближава до регистрирания от автоматичната станция пик (123.580 m³/s). Симулираният пик на 10.03.2020 г. към ХМС 21850 – р. Вит при с. Биволаре е 96.660 m³/s и се доближава до регистрирания от автоматичната станция пик (101.944 m³/s).

IV.5. Изводи

Графичното представяне на резултатите от моделирането на водните количества с месечна стъпка с първоначално приетите физически базирани параметри показва много добро описване на високите води.

Добрите статистически оценки на първоначалните резултати от моделирането на водните количества с месечна стъпка (табл. IV.1.1) показват добра сходимост между симулираните и измерени водни количества, както и надеждност на параметрите, извлечени от пространствените данни. Това дава основания да се премине към калибрирането на модела с дневна стъпка по време.

Първоначалните резултати от моделирането на дневните водни количества (табл. IV.1.2) показват добро описание на високите вълни като при всички станции пиковите им са завишени.

При почти всички мониторингови точки моделираните дневни водни количества са занижени при ниските и средните води. Изключение е ХМС 21750 – с. Крушовица, където, както и при симулацията с месечна стъпка, моделираните водни количества са завишени при средните и високите води и са занижени при ниските, което се вижда и от резултатите за PBIAS (табл. IV.1.2).

Опитът при калибрирането на модела и сравнението между некалибрирани и калибрирани симулации показва, че стойностите на първоначално приетите параметри са твърде обобщени в базата данни на SWAT, затова е необходимо да се направи чувствителен анализ на параметрите, за да бъдат определени тези от тях (и съответните им стойности), които са най-значими за модела.

Моделът SWAT дава много добри резултати при симулирането на високи вълни, както по отношение на стойностите на пиковите на високите вълни, така и по време на настъпване на пика.

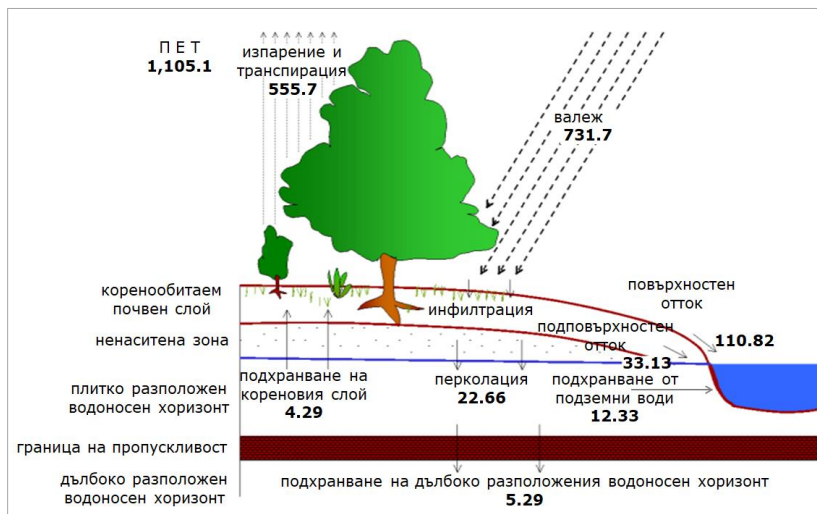
Анализът на графичното представяне на резултатите от симулациите и значимите статистически резултати показват, че моделът може да бъде приложен в оперативната дейност на секция „Хидропрогнози“ за прогнозиране на речния отток във водосбора на р. Вит.

V. Приложения на хидроложкия модел

V.1. Оценка на водния баланс за водосбора на р. Вит

Валежът, евапотранспирацията, повърхностният отток, подповърхностният и подземният отток съставляват по-голямата част и са съответно и най-важните елементи на водния баланс.

За оценка на водния баланс, калибрираният модел SWAT е приложен за водосбора на р. Вит с хидрометеорологични данни за периода 2015 г. – 2020 г. (с две години подгряващ период). Използвана е информация за среднодневни минимални и максимални температури на въздуха и 24 ч. сума на валежа от метеорологичните станции във водосбора на р. Ви. В резултат на симулациите са получени количествените измерения на елементите на водния баланс - фиг. V.1.1 и табл. V.1.1 са дадени стойностите на главните му компоненти.



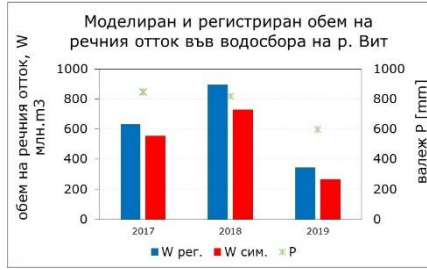
фиг. V.1.1. Схема и разпределение на основните компоненти на хидроложкия цикъл във водосбора на р. Вит, моделиран със SWAT

табл. V.1.1. Средна стойност на основните компоненти на водния баланс във водосбора на р. Вит за периода 2017 г.-2020 г.

Компоненти на водния баланс	Стойност [mm]
Валеж (вкл. снеговалеж)	732
Повърхностен отток	111
Подповърхностен отток	33
Подхранване от подземни води	12
Подхранване на дълбоко разположения водоносен хоризонт	5
Евапотранспирация	556
Общо	732 717

Средногодишната стойност на евапотранспирацията във водосбора като относителен дял към средногодишната валежна сума е 76% (556 mm). Общият обем на симулирания отток във водосбора е 156 mm, като 71% от него се формира от повърхностни води. Количеството вода, което преминава границата на пропускливост и подхранва дълбоко залежания водоносен хоризонт, е под 1%. Сумарно стойността на симулираните елементи е с 15 mm по-малко от средната валежна сума за разглеждания период, което показва, че хидроложкият модел представя добре водния баланс във водосбора.

Резултатите от моделирания обем на речния отток за периода на калибриране (2017 г.–2020 г.) показват, че моделът симулира стойности близки до изчислените (фиг. V.1.2.) и макар и незначително, симулираният обем на речния отток е по-малък от изчисления и за трите години.



фиг. V.1.2. Моделиран и регистриран обем на речния отток

За периода на валидиране (2020 г.) симулираният обем на речния отток надвишава изчисления такъв със 7% (фиг. V.1.3). В месеците с големи валежни суми симулираният обем на речния отток надвишава регистрирания такъв, а в месеците с по-малки валежни суми моделът симулира по-малко количество на речния отток.



фиг. V.1.3. Вътрешногодишно разпределение на обема на речния отток във водосбора на р. Вит за 2020 г.

По-детайлна представа за хидроложкия цикъл във водосбора на р. Вит дава разпределението в проценти на елементите на водния баланс за всяка една година от изследвания период – фиг. V.1.4.

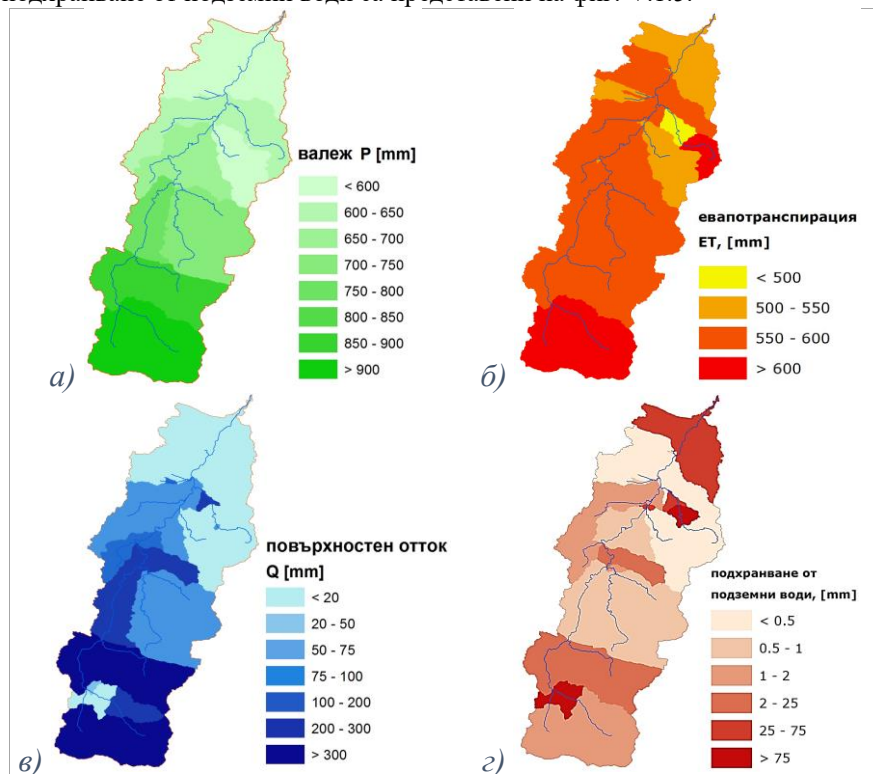


V.1.4. Разпределение на елементите на водния баланс във водосбора на р. Вит за периода 2017 г. - 2020 г.

Евапотранспирацията е с най-голям относителен дял между компонентите на водния баланс, а с най-малък е подхранването на дълбоко залегналия водоносен хоризонт. Резултатите за 2017 г. и 2018 г. показват аналогично разпределение на компонентите на водния баланс във водосбора, докато резултатите за 2019 и 2020 г. показват значително изменение в хидрологичните процеси във водосбора.

Близко 90% от валежите за водосбора през 2019 г. са се върнали в атмосферата чрез евапотранспирация, а за 2020 г. процентът е 81. Причина за високите стойности на евапотранспирацията през тези две години са високите температури, като по данни на НИМХ 2019 г. е най-топлата година от 1930 г. насам, а 2020 е втората най-топла такава.

Пространственото разпределение на средногодишната валежна сума и моделираните актуална евапотранспирация, повърхностен отток и подхранване от подземни води са представени на фиг. V.1.5.



фиг. V.1.5. Разпределение на елементите на водния баланс във водосбора на р. Вит за периода 2017 г. - 2020 г.: а) средногодишна валежна сума; б) моделирана актуална евапотранспирация; в) моделиран повърхностен отток; г) моделирано подхранване от подземни води

Пространственото разпределение на валежа във водосбора на р. Вит за периода 2017 г.–2020 г. съответства на климатичните условия: валежните суми са най-големи във високоразположените подводосбори (33-38) и намаляват с понижаване на надморската височина.

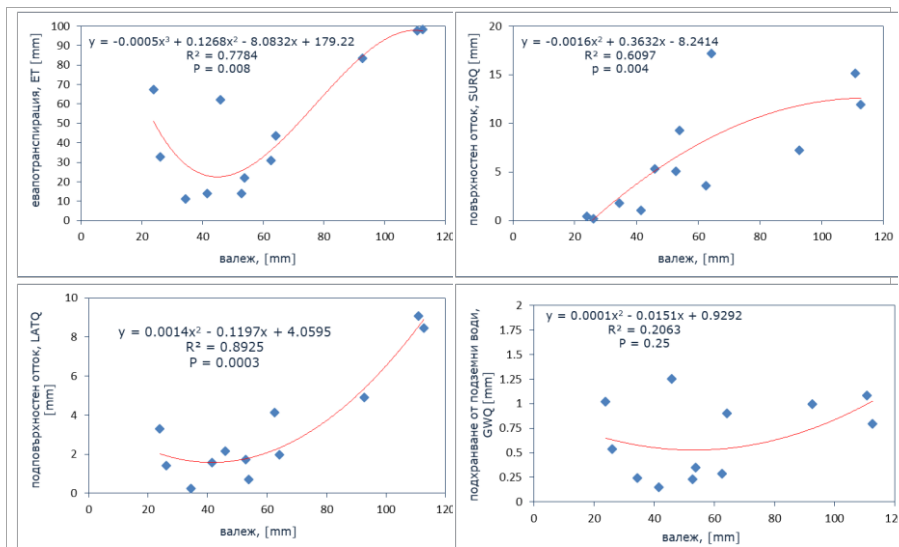
Пространственото изменение на моделираната евапотранспирацията показва, че най-големи са стойностите ѝ във високоразположените подводосбори и намаляват с понижаване на надморската височина. В равнинната част на водосбора прави впечатление неравномерното разпределение на евапотранспирацията: най-ниска е стойността на евапотранспирацията в подводосбора, в който е разположен гр. Плевен (#17), доакато в съседния подводосбор, в който са разположени язовирите Кайлъка и Тотлебенов вал (#22) стойностите ѝ са високи.

От представените на фиг. V.1.5. карти се забелязва рязкото понижаване на стойността на повърхностния отток респективно рязкото увеличение на подхранването от подземни води за подводосбори #33- #35. Това се дължи на факта, че тези подводосбори са разположени изцяло в карстов район.

Пространственото разпределение на подхранването от подземни води показва високи стойности за водосбора на р. Тученица (подводосбори #16, #17 и #21) - районът, в който са разположени тези подводосбори е карстов, Подхранването от подземни води е с високи стойности и в най-ниско разположения подводосбор (#1): той се намира в Чернополската низина, която представлява заливна речна тераса, разположена на 2–7 м над нивото на Дунав и има високи подпочвени води.

На фиг. V.1.6. е представена връзката между средномесечните стойности на отделните елементи на водния баланс и валежните количества във водосбора на р. Вит.

Резултатите показват, че валежът оказва значително влияние върху повърхностния (SURQ) и подповърхностния отток (LATQ). Коефициентът на детерминация на нелинейната корелация е 0.61 за повърхностния отток и валежа, 0.89 за подповърхностния отток и валежа и 0.78 за евапотранспирацията и валежа. Стойността на равнището на значимост P (< 0.05) също отразява много добра корелация между повърхностния отток и валежа, подповърхностния отток и валежа и евапотранспирацията и валежа. Графичното представяне на връзката между валеж и подземните води не показва ясна зависимост, което би могло да се обясни с вариациите в дълбочината на почвения профил в отделните части на водосбора.



фиг. V.1.6. Графична зависимост между средномесечните стойности на валежа и моделираните а) актуална евапотранспирация; б) повърхностен отток; в) подповърхностен отток; г) подхранване от подземни води

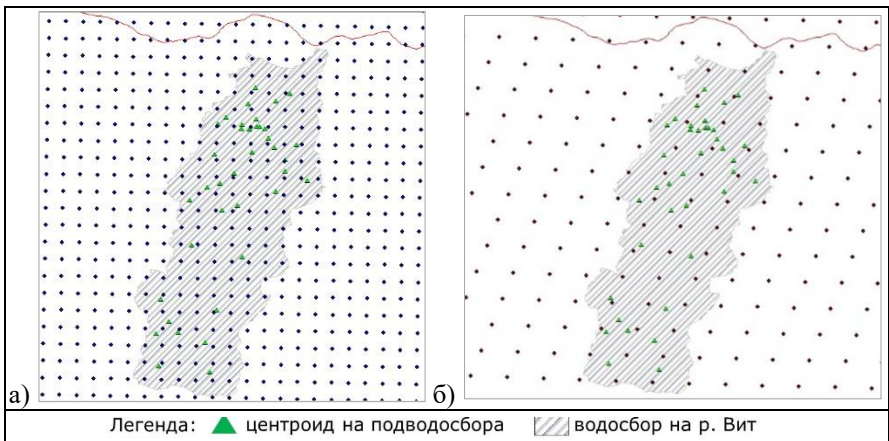
V.2. Прогнозиране на речния отток във водосбора на р. Вит

В настоящия дисертационен труд е направен анализ на резултатите за прогнозираните водни количества във водосбора на р. Вит като е използвана прогностична метеорологична информация както от числения модел ALADIN – България, така и от интегрираната прогностична система на Европейския център за средносрочни прогнози за времето – ECMWF-IFS.

ALADIN-BG е спектрален модел за регионална прогноза на метеорологични полета и явления. ALADIN-BG дава 72-часова прогноза два пъти на денонощие: в 06 и 18 UTC и 48-часова прогноза два пъти на денонощие: в 00 и 12 UTC. Домейнът на ALADIN-BG е район, обхващащ почти целия Балкански полуостров и центриран върху България.

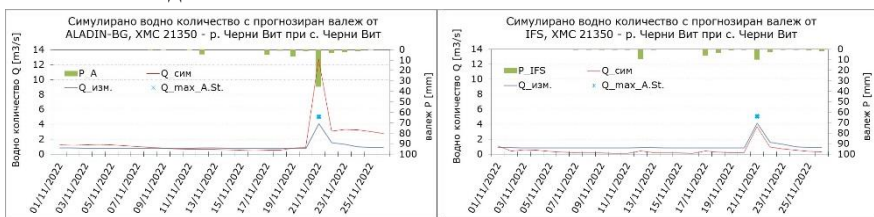
Интегрираната прогностична система на Европейския център за средносрочни прогнози за времето (ECMWF – IFS) дава 10-дневна прогноза два пъти на денонощие: в 00 и 12 UTC.

На фиг. V.2.1 са показани точките от мрежите на числените модели ALADIN-BG и ECMWF-IFS и центроидите на отделните подводосбори, в които се записва необходимата входна метеорологична информация за създадения в SWAT хидрологичен модел.

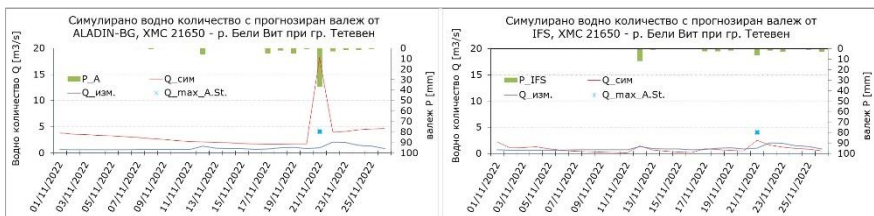


фиг. V.2.1. Мрежа на численияте модели: а) ALADIN-BG и б) IFS

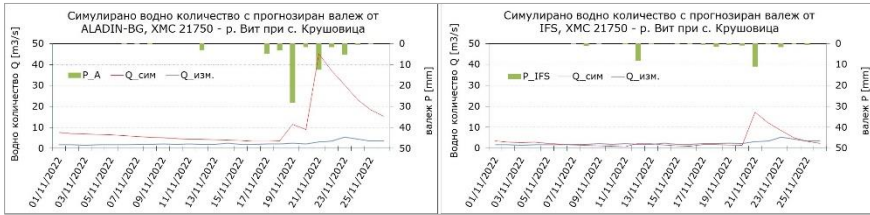
На фигури V.2.2-V.2.6 са представени резултатите от моделиране с прогностична информация (валежни суми, минимални и максимални температури на въздуха) за периода 01.11.2022 г.-26.11.2022 г. На графиките са изобразени прогнозираните водни количества за хидрометричните станции във водосбора на р. Вит, за които има ежедневна информация за измерени водни нива и отчетени по временни ключови криви водни количества. За ХМС 21350 и 21650 са представени и измерените от автоматичните станции максимални водни количества.



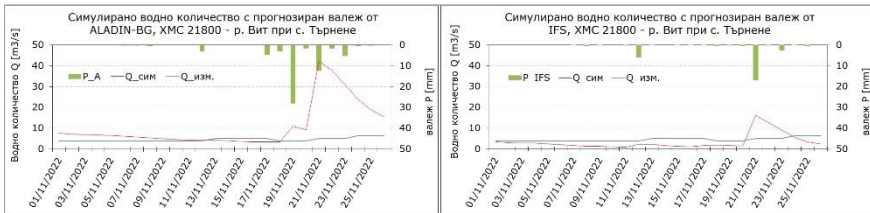
фиг. V.2.2. Моделирани ежедневни водни количества с прогностична информация за ХМС 21350 - р. Черни Вит при с. Черни Вит



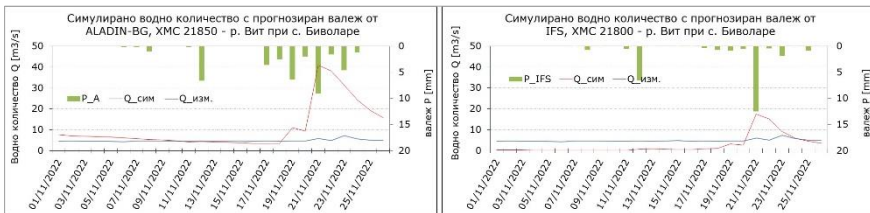
фиг. V.2.3. Моделирани ежедневни водни количества с прогностична информация за ХМС 21650 - р. Бели Вит при гр. Тетевен



фиг. V.2.4. Моделирани ежедневни водни количества с прогностична информация за XMC 21750 - р. Вит при с. Крушовица



фиг. V.2.5. Моделирани ежедневни водни количества с прогностична информация за XMC 21800 - р. Вит при с. Търнене

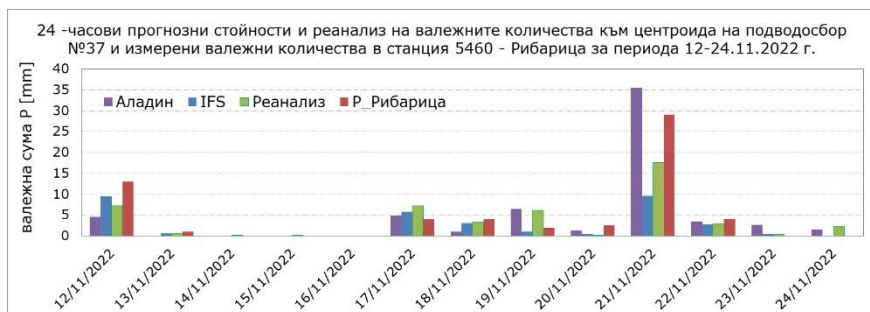


фиг. V.2.6. Моделирани ежедневни водни количества с прогностична информация за XMC 21850 - р. Вит при с. Биволаре

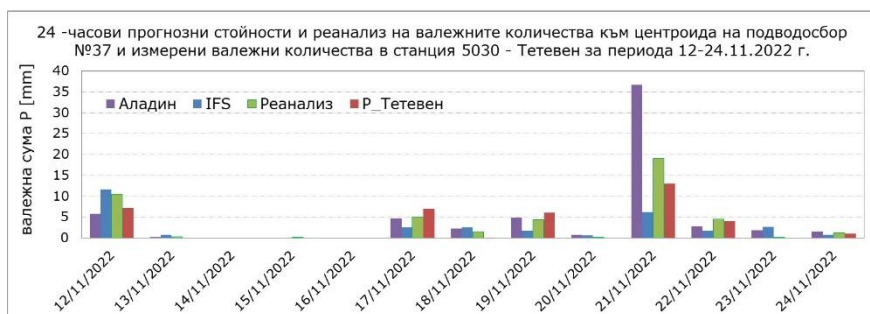
Хидрографите на прогнозираните водни количества към мониторинговите станции във високите части на водосбора показват, че моделът симулира добре формираните вълни както по отношение на формата, така и по отношение на времето на настъпване на пика с информация и от ALADIN-BG и от ECMWF – IFS.

Предвид по-високите стойности на прогнозираните за периода 21.11.2022 г.-26.11.2022 г. водни количества към XMC #21650 (р. Бели Вит при гр. Тетевен), е анализирана информацията за валежната обстановка (12.11.2022 г.-24.11.2022 г.) в района - прогнозни стойности, реанализ и измерени количества в рамките на разглеждания период. Прогнозираните стойности на валежа с модела ALADIN-BG на 21.11.2022 г. са значително завишени, което се отразява и на симулираните водни количества. На фиг. V.2.7 и фиг. V.2.8 са представени прогнозираните към центроидите на подводосбори #36 и #37 валежи и действително измерените валежни

количества съответно в станциите при гр. Тетевен и с. Рибарица (най-близко разположените до центроидите им).



фиг. V.2.7. Прогнозирани и измерени валежни количества към подводосбор #37 и в станцията при с. Рибарица респективно



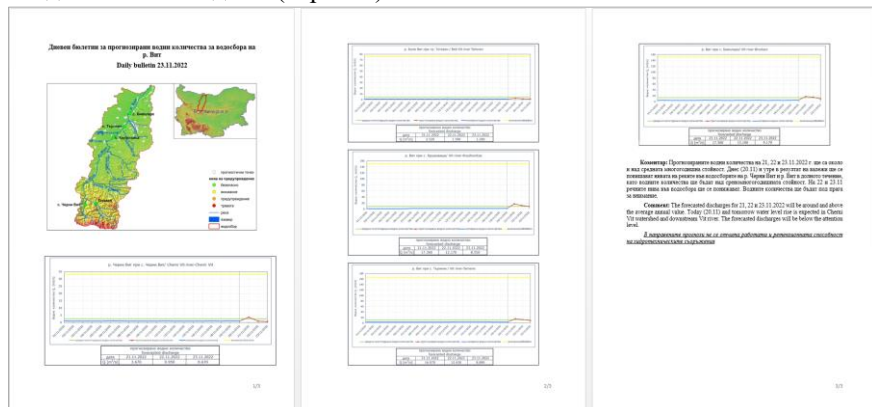
фиг. V.2.8. Прогнозирани и измерени валежни количества към подводосбор #36 и в станцията при гр. Тетевен респективно

В средните и долни части на водосбора прогнозираните хидрографи са сходни по форма като прогнозираните максимални водни количества са значително завишени с прогностичната информация от ALADIN-BG.

Една от целите на настоящата работа е включването в ежедневната оперативна дейност на секция „Хидрологични прогнози“ в НИМХ на хидроложкия модел за р. Вит като средство за прогнозиране на речния отток. На този етап е решено да се използват данните от модела ALADIN-BG, като в допълнение се следи и информацията от ECMWF с прогнозни стойности за валежи и температура на въздуха за 10 дни напред.

Ежедневната прогноза за речния отток във водосбора на р. Вит е представена като графики, таблици и коментар за прогнозиран водни количества за следващите три дни и отчетени по временни ключови криви водни количества за девет дни назад (фиг. V.2.9). 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. V.2.9. Дневен бюлетин за прогнозиран водни количества за водосбора на р. Вит

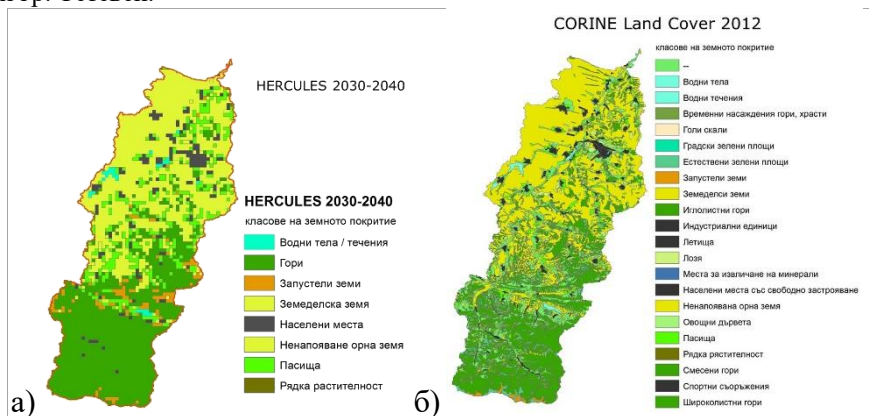
V.3. Изследване влиянието на земеползването (земното покритие) върху режима на речния отток във водосбора на р. Вит

В световен мащаб изменението на повърхността на Земята в резултат на човешка дейност е известно като промяна на земеползването/земното покритие – Land use/Land cover change (LULCC). Промените в земеползването – урбанизация, обезлесяване и др., водят до изменение и на хидрологичните процеси във водосборите, като влияят пряко и в значителна степен на формирането на оттока.

В дисертационния труд за изследване на влиянието на бъдещото изменение на земното покритие е използвана информация от проект „HERCULES: Sustainable futures for Europe’s HERitage in CULTural landscapES: Tools for understanding, managing, and protecting landscape functions and values“, реализиран в периода 2013 г.–2016 г. в рамките на Седма рамкова програма на Европейския съюз за научни изследвания.

Анализирани са резултатите от проекта под формата на сценарии на бъдещо изменение на земното покритие, като главната цел е да бъдат определени параметрите на земното покритие, които влияят на формирането на речния отток (отточен коефициент, коефициент на грапавина по Манинг). Тези параметри са използвани като входна информация в хидроложкото моделиране, за да се оцени влиянието на изменението на земното покритие върху пространствената и времева променливост на хидроложките характеристики във водосбора на р. Вит.

Избраният сценарий на промяна на земното покритие (HERCULES) е представен на фиг. V.3.1. При сравнение на сценарий HERCULES с картата на земното покритие CLC2012 е видимо изменението на земното покритие във високите части на водосбора, както и за районите на гр. Плевен, с. Рибарица и гр. Тетевен.



фиг. V.3.1 .Карта на земното покритие: а) при сценарий на бъдеща промяна HERCULES; б) CORINE Land Cover 2012

На фиг. V.3.2 е дадена информация за разпределението на основните класове на земното покритие при двата сценария: CLC2012 и HERCULES.



фиг. V.3.2. Разпределение на основните класове на земното покритие със сценарии CLC2012 и HERCULES.

Анализът на разпределението на класовете на земното покритие във водосбора на р. Вит към 2040 г. показва по-съществено увеличение на горските площи (+10%) и пасищата (+7%) и минимално нарастване на населените места (+1%) за сметка главно на земеделската земя, включително ненапоиваната орна земя (-14%).

Хидроложките процеси във водосбора на р. Вит са ремоделирани, като е използвана информацията за характеристиките на земното покритие за избрания сценарий на промяна на земеползване от базата данни на проекта

HERCULES. SWAT е приложен с калибрираните параметри от валидирания хидроложки модел (глава IV) и метеорологична информация за периода 2015 г. – 2020 г.

V.3.1. Анализ и оценка на изменението на речния отток във водосбора на р. Вит с прилагане на сценарий на промяна на земното покритие

Резултатите от симулациите за разглеждания период с различните сценарии на земно покритие показват, че средногодишното водно количество е по-голямо при почти всички станции във водосбора със сценарий HERCULES 2030–2040. Единствено в подводосбор #36 (ХМС 21650 – р. Бели Вит при Тетевен) моделираното средногодишно водно количество и с двата сценария е с почти еднакви стойности.



фиг. V.3.1.1. Симулирано средногодишно водно количество във водосбора на р. Вит при сценарии на земното покритие CLC2012 и HERCULES.

Анализът на моделираните средномесечни водни количества във водосбора на р. Вит показва, че във високите части (ХМС 21350 и 21650) в периода на пролетното пълноводие и летните месеци при сценария HERCULES има увеличение на оттока.

В средните и долните части на водосбора (ХМС 21500, 21750, 21800, 21850), където делът на горите и урбанизацията при сценарий HERCULES се увеличава, симулираният със същия сценарий повърхностен отток е по-голям от този, симулиран със сценарий CLC2012.

По-подробна информация за отточния режим във водосбора на р. Вит при различните сценарии на земно покритие дават моделираните ежедневни водни количества. На фигури V.3.1.2-V.3.1.7 са представени хидрографите на симулираните водни количества при хидрометричните станции във водосбора на р. Вит с използване сценариите CLC2012 и HERCULES.



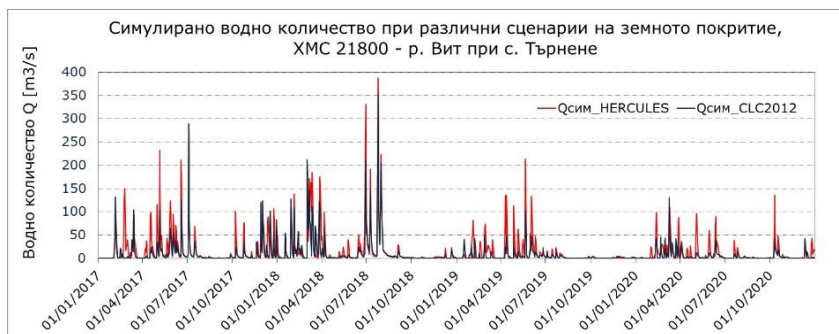
фиг. V.3.1.2. Моделирани ежедневни водни количества със сценарии на земно покритие CLC2012 и HERCULES за подводосбор #38



фиг. V.3.1.3. Моделирани ежедневни водни количества със сценарии на земно покритие CLC2012 и HERCULES за подводосбор #36



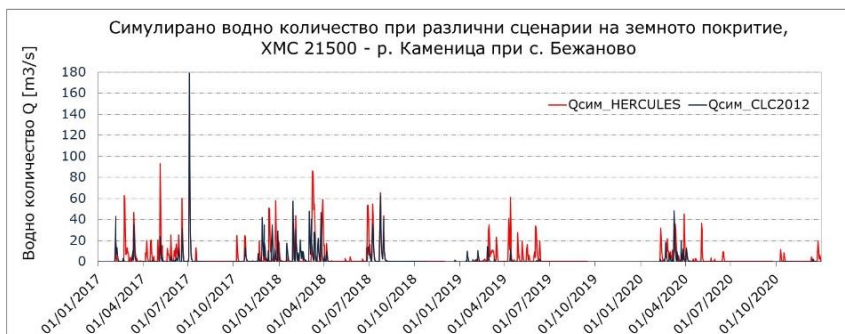
фиг. V.3.1.4. Моделирани ежедневни водни количества със сценарии на земно покритие HERCULES и CLC2012 за подводосбор #23



фиг. V.3.1.5. Моделирани ежедневни водни количества със сценарии на земно покритие HERCULES и CLC2012 за подводосбор #18



фиг. V.3.1.6. Моделирани ежедневни водни количества със сценарии на земно покритие HERCULES и CLC2012 за подводосбор #5



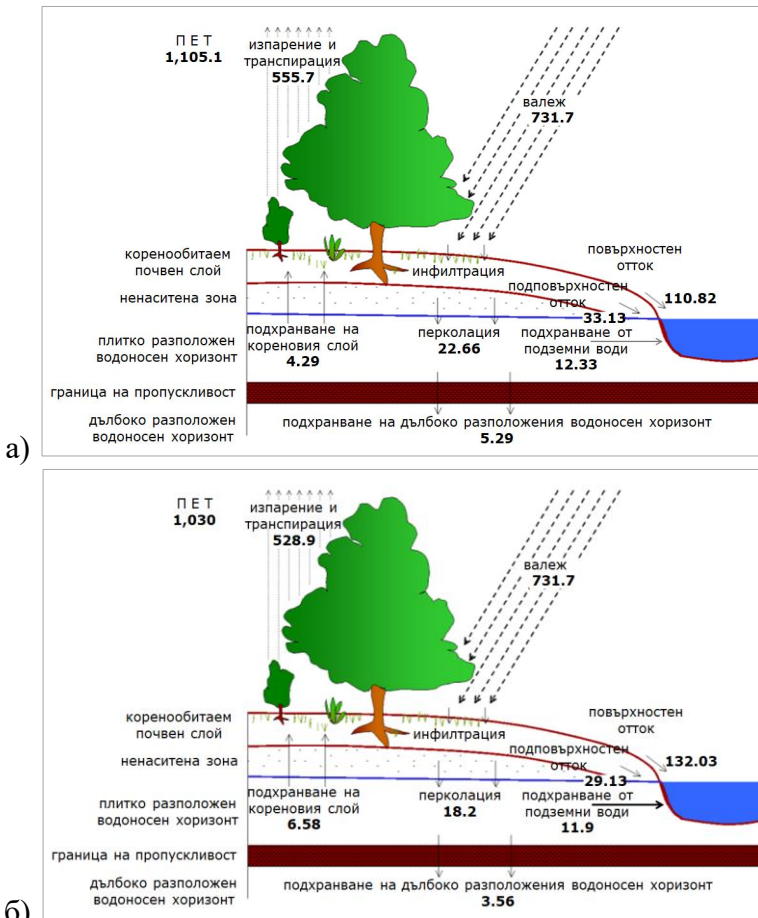
фиг. V.3.1.7. Моделирани ежедневни водни количества със сценарии на земно покритие HERCULES и CLC2012 за подводосбор #29

Ходографите на моделираните ежедневни водни количества показват, че симулираните със сценарий HERCULES водни количества са значително завишени в периодите на пълноводие и интензивни валежи. В периодите на ниски води симулираните със същия сценарий водни количества са по-малки.

V.3.2. Анализ на изменението на елементите на водния баланс във водосбора на р. Вит с прилагане на сценарий на промяна на земното покритие

Цялостната оценка за влиянието на изменението на земеползването (земното покритие) върху хидроложкия режим във водосбора на р. Вит разглежда и изменението на компонентите на водния баланс във водосбора.

На фиг. V.3.2.1 е представен хидрологичния цикъл във водосбора на р. Вит с използване на информация за земното покритие от CLC2012 и с приложен сценарий на изменение на земното покритие HERCULES. В табл. V.3.2.1 са дадени стойностите на главните компоненти на водния баланс от симулациите с CLC2012 и HERCULES.



фиг. V.3.2.1. Схема и разпределение на основните компоненти на хидрологичния цикъл във водосбора на р. Вит с информация за земното покритие от: а) CLC2012 и б) HERCULES

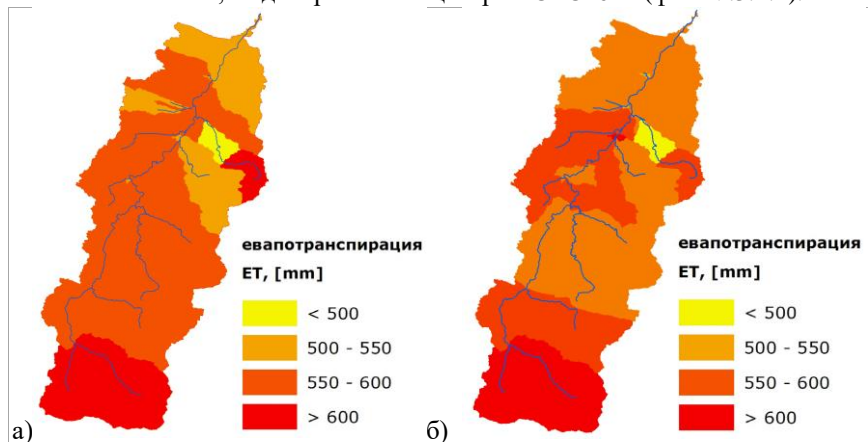
табл. V.3.2.1. Средна стойност на основните компоненти на водния баланс във водосбора на р. Вит за периода 2017 г. - 2020 г.

Компоненти на водния баланс	Стойност [mm], CLC2012	Стойност [mm], HERCULES
Валеж (вкл. снеговалеж)	732	732
Повърхностен отток	111	132
Подповърхностен отток	33	29
Подхранване от подземни води	12	12
Подхранване на дълбоко разположения водосносен хоризонт	5	4
Евапотранспирация	556	529
Общо	732	706

Представената в табл. V.3.2.1 информация показва, че при едни и същи метеорологични условия разликата в стойността на повърхностния отток е значителна, като при симулациите със сценарий HERCULES същият се е увеличил с 18%. Съпоставяйки останалите основни компоненти на водния баланс се установява, че при всички тях стойността им намалява при симулациите със сценарий HERCULES.

Сумарно стойността на симулираните със сценарий HERCULES елементи на водния баланс показва известно увеличение на загубите на вода от водосбора спрямо сценарий CLC2012: моделът е симулирал с 26 mm по-малко от средната валежна сума за разглеждания период във водосбора на р. Вит, като при сценарий CLC2012 загубите на вода са 15 mm.

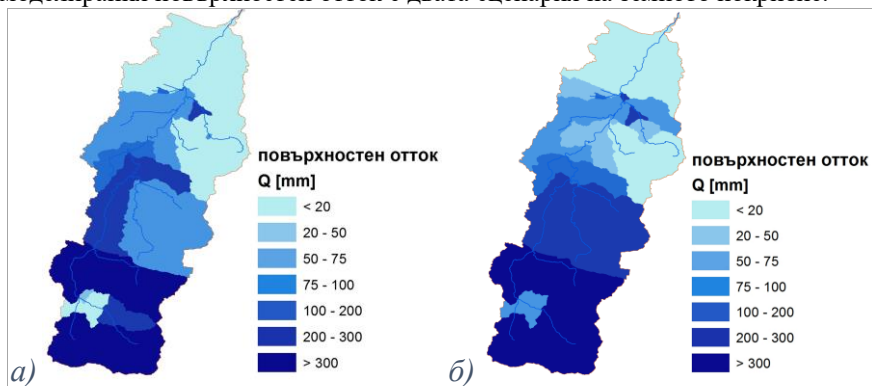
Графичното представяне на резултатите от симулациите с различните сценарии на земеползване показват, че при почти всички подводосбори стойностите на моделираната със сценарий HERCULES евапотранспирация са по-ниски от тези, моделирани със сценарий CLC2012 (фиг. V.3.2.2).



фиг. V.3.2.2. Пространствено разпределение на моделираната евапотранспирация със сценарии: а) CLC2012 и б) HERCULES

Пространственото изменение на моделираната евапотранспирация и при двата сценария показва, че най-големи са стойностите ѝ във високоразположените подводосбори (#33-#38), в които преобладаващите класове на земното покритие са гори (широколистни и смесени), както и в подводосборите, в които са разположени язовири - #11 (яз. Долна Митрополия) и #24 (яз. Тотлебенов вал). И при двата сценария най-ниски са стойностите на моделираната евапотранспирация във водосборите, в които попадат по-големи населени места: гр. Плевен (#17, #21), гр. Долна Митрополия (#7), с. Горна Митрополия (#9), с. Садовец (#25), с. Подем (#3).

На фиг. V.3.2.3 е представено пространственото разпределение на моделирания повърхностен отток с двата сценария на земното покритие.



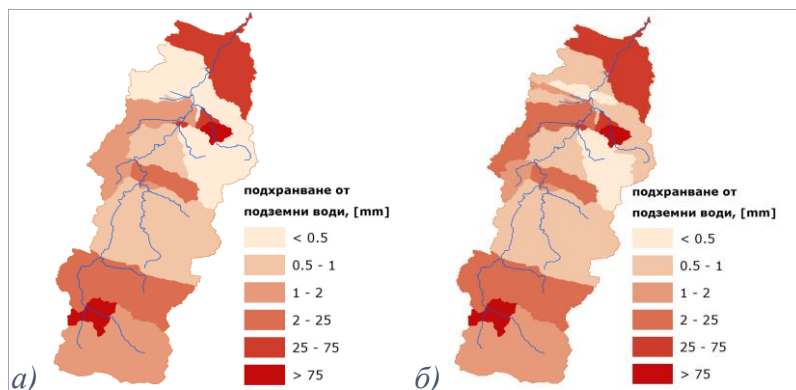
фиг. V.3.2.3. Пространствено разпределение на моделиран повърхностен отток със сценарии: а) CLC2012 и б) HERCULES

От представените на фиг. V.3.2.3 карти е видно, че и при двата сценария на земното покритие пространственото разпределение на моделирания повърхностен отток е аналогично: най-високи са стойностите във високите части на водосбора и намаляват с понижаване на надморската височина.

Резултатите от симулациите със сценарий HERCULES показват увеличение на стойността на повърхностния отток основно в горната и средна части от водосбора (подводосбори # 34, #35 и #36) и във водосбора на р. Каменица (#29). При същия сценарий стойността на повърхностния отток в подводосбор #19 намалява.

Увеличение на стойността на повърхностния отток отново при сценарий HERCULES се наблюдава и в равнинната част от водосбора.

На фиг. V.3.2.4 е представено пространственото разпределение на моделираното подхранване от подземни води с двата сценария на земното покритие.



фиг. V.3.2.4. Пространствено разпределение на моделираното подхранване от подземни води със сценарии: а) CLC2012 и б) HERCULES

Графичното представяне на резултатите от симулациите и при двата сценария на земеползване показват аналогично пространствено разпределение на стойностите на подхранването от подземни води. Резултатите от симулациите със сценарий HERCULES показват увеличаване на стойностите на подхранването от подземни води в равнинната част от басейна на р. Вит.

Резултатите от моделирането с различните сценарии на земно покритие показват, че изменението на стойностите на параметрите на отделните класове земно покритие оказва не толкова съществено влияние на формирането на отток от подземни води във водосбора на р. Вит.

V.4 Изводи

С прилагането на SWAT модела и използването на информация за среднодневни, минимални и максимални температури на въздуха и 24-часова сума на валежите може да се прави оценка на елементите на водния баланс по месеци и години.

Хидроложкият модел за водосбора на р. Вит представя добре водния баланс по години, като симулираните стойности са близки до изчислените.

Вътрешногодишното разпределение на обема на речния отток потвърждава резултатите от валидирането на хидроложкия модел: при големи валежни суми моделът надвишава изчисления обем на речния отток и го занижава в по-сухи периоди.

Така представеният анализ на водния баланс във водосбора на р. Вит показва, че SWAT успешно симулира процеса „валеж - отток“ и би могъл да бъде използван за хидрологични изследвания и в други водосбори.

Резултатите от моделиране на ежедневни водни количества с прогностична информация показват, че във високите части на водосбора моделът симулира добре формираните вълни, както по отношение на

формата, така и по отношение на времето на настъпване на пика с информация и от ALADIN-BG и от ECMWF – IFS.

Хидроложият отговор във водосбора на р. Вит е адекватен на прогнозираните от ALADIN-BG и ECMWF – IFS валежни количества. Симулираните с прогнозни данни от ALADIN-BG водни количества значително надвишават измерените такива.

Резултатите от симулациите с различните сценарии на земеползване показват, че при почти всички подводосбори стойностите на моделираната със сценарий HERCULES евапотранспирация са по-ниски от тези, моделирани със сценарий CLC2012.

Резултатите от симулациите със сценарий HERCULES показват увеличение на стойността на повърхностния отток основно в горната и средната части от водосбора и във водосбора на р. Каменица.

Според резултатите от моделирането с различните сценарии на земно покритие, изменението му има несъществено влияние върху формирането на отток от подземни води във водосбора на р. Вит.

ПРИНОСИ

На основата на проведените изследвания и получените резултати, могат да се формулират следните приноси:

Приноси с научно-фундаментален характер

Направен е подробен анализ за възможността за използване на физически базиран полуразпределен хидроложки модел за моделиране на речния отток в България.

Определени са подходящите за хидроложкия модел параметри от различни източници на данни: цифров модел на терена, карта на земното покритие, почвена карта.

Създаден е модел за симулиране на оттока във водосбора на р. Вит с използване на програмен продукт SWAT.

Направена е детайлна оценка на представянето от модела SWAT на пространствената променливост на елементите на оттока.

Изследвано е влиянието на промяната на земното покритие върху резултатите от хидроложкото моделиране.

Приноси с научно-приложен характер

Хидроложкият модел SWAT е приложен за прогнозиране на речния отток във водосбора на р. Вит. Резултатите ще бъдат публикувани в Прогноза за оттока на реки в Дунавския басейн на уеб страницата <https://hydro.bg/>.

Създаден е модел за оценка на обема на речния отток на месечна и годишна база. Резултатите ще бъдат използвани при изготвяне на Месечен хидрометеорологичен бюлетин, част IV: Хидрологична оценка на речния отток

Създадена е ГИС база-данни за приложение в хидроложкото моделиране

ПУБЛИКАЦИИ

1. S. Stoyanova, Sn. Balabanova “Hydrological modelling with the Soil and Water Assessment Tool: spatial data processing for identifying model parameters using Geographic Information System”, 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019 Book number 3.1, pp 253-258

2. S. Stoyanova “Hydrological Modelling for Water Balance Components Assessment”, XXIX Conference of the Danubian Countries, 2021

БЛАГОДАРНОСТИ

Изразявам безграничната си благодарност към моя научен ръководител, доц. д-р Снежанка Балабанова, за дадената възможност и гласуваното доверие за разработването на настоящия дисертационен труд. Благодаря ѝ за упоритостта и безкрайното търпение, всеотдайната подкрепа и безценните напътствия и съвети през целия период на работа.

Благодаря и на моя научен консултант, проф. Валери Спиридонов, за ценните му насоки по време на разработването на дисертацията.

Сърдечно благодаря на колегите от департамент „Хидрология“, които ми подготвиха и предоставиха необходимата хидрологична информация и от хидрометричните станции, и за избрани високи вълни.

Изказвам своите благодарности към колегите от департамент „Метеорология“ за предоставената метеорологична информация и за консултациите при изготвянето на климатичния анализ.

Огромни благодарности и на доц. д-р Илиян Господинов и проф. д-р Валери Спиридонов за подготовката и предоставянето на прогностична информация от модела ALADIN-BG, както и за конструктивните им съвети.

Искрено благодаря и на доц. д-р Веска Георгиева за консултациите и насоките в областта на агрометеорологията.

Дълбоко благодаря и на колегите ми от секция „Хидрологични прогнози“ за желанието и готовността им да обсъждат идеи, да споделят опит и знания и за мотивиращите дискусии. Благодаря им за разбирането, търпението и подкрепата по време на работата по дисертацията.

Благодаря от сърце и на семейството ми за безрезервната подкрепа и безграничното търпение!

Благодаря на всички, които ми помогнаха по един или друг начин!