



Verification of hydrological forecasts

Georgy Koshinchanov*, Snezhanka Balabanova

National of Institute of Meteorology and Hydrology, 66 Tsarigradsko shosse Blvd., 1784 Sofia, Bulgaria

Abstract: The possibility of simulating and forecasting of discharges and water levels is of great importance nowadays. It is also important to know how accurate a given forecast is. That is why a verification of the forecast should be an integral part of the forecasting. The process of continuous checking of the quality of the hydrological forecasts provides valuable information for both the forecasters and the forecast users (Welles, et al., 2007). The information can be used to evaluate forecasts, to improve them and how to use forecast products. This information is also important for specialists who develop different models (hydrological, hydraulic and empirical). Hydrological forecast verification can be applied to various hydrological phenomena, such as snowmelt runoff, high waves, low waters, also for floods and droughts. Due to the great importance of this process, the article will focus on this aspect of the forecasts, using the achievements of the PhD thesis for the catchment of the Rusenski Lom River (in particular for the catchment of the Cherni Lom River to the Shirokovo hydrometric station) (Koshinchanov, 2016).

Keywords: hydrological model, quality of hydrological forecasts, verification, statistical scores estimates

Верификация на хидроложките прогнози

Георги Кошинчанов*, Снежанка Балабанова

Национален Институт по Метеорология и Хидрология, бул. „Цариградско шосе“ 66, 1784 София

Резюме: В наши дни възможността за симулиране и прогнозиране на водни количества и водни нива е от изключителна важност. Не по-малко важно е колко точна е дадена прогноза. Затова верификацията трябва да бъде неизменна част от прогнозирането. Непрекъснатият процес на проверка качеството на хидрологичните прогнози предоставя ценна информация, както за тези, които изготвят прогнозите,

* georgy.koshinchanov@meteo.bg

така и за потребителите на прогнози (Welles, et al., 2007). Информацията може да се използва за оценка на прогнозите, за подобряването им и за начина на използване на прогностичните продукти. Тази информация е важна и за специалистите, които разработват различните модели (хидрологични, хидравлични и емпирични). Верификацията на хидрологичната прогноза може да се прилага и за различни хидрологични явления, като отток от снеготопене, високи вълни, ниски води, включително наводнения и суши. Поради изключителната важност на процеса на верификация, статията ще се фокусира именно върху този аспект на прогнозите, използвайки постигнатото в дисертационния труд за водосбора на р. Русенски Лом (в частност за водосбора на р. Черни Лом до хидрометрична станция Широково) (Кошинчанов, 2016).

Ключови думи: хидроложки модел, качество на хидроложки прогнози, верификация, статистически оценки

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Предмет на настоящето изследване е водосборът на река Черни Лом. Тя е един от двата основни притоци на р. Русенски Лом. Водосборът на реката се намира в североизточна България (фиг. 1). Основните хидроложки характеристики на водосбора на реката до хидрометричната станция при с. Широково са показани по-долу в Таблица 1.

Table 1. Basic hydrological characteristics of the watershed of Cherni Lom river up to Shirokovo

Таблица 1 Основни хидроложки характеристики на водосбора на р. Черни Лом до хидрометрична станция при с. Широково

Площ на водосбор, [km ²]	Дължина на реката, [km]	Средна надморска височина, [m]	Среден наклон на водосбора, [%]	Среден наклон на реката, [‰]
1397.5	72.5	287	10.5	5.15

Релефът на водосбора е хълмисто-платовиден. По отношение геоложкия строеж водосборът се намира върху мизийската плоча, представляваща плоско наслоение на пластове върху старонагъната херцинска основа. В тази област се разкриват мергелно-варовитите пластове на долна креда, които са по-силно и дълбоко окарстени.

Поречието на р. Черни Лом е слабо залесено с нискостеблени гори. Залесеността на водосбора е около 30 %.

Вътрешногодишното разпределение на оттока във водосбора на река Черни Лом (фиг. 2) се определя от преобладаващите климатични, релефни и почвено-геоложките особености на района: типичен умереноконтинентален климат с не много обилни валежи през есента и зимата. Стопеният сняг през зимата не дава висок речен отток, поради равнинно-хълмистия терен, наличието на льосови

почви и карст. Пълноводието в басейна се наблюдава предимно през пролетта и началото на лятото (февруари-юли) (фиг. 2), като в периода април-юни по-често се случват и интензивни дъждове.

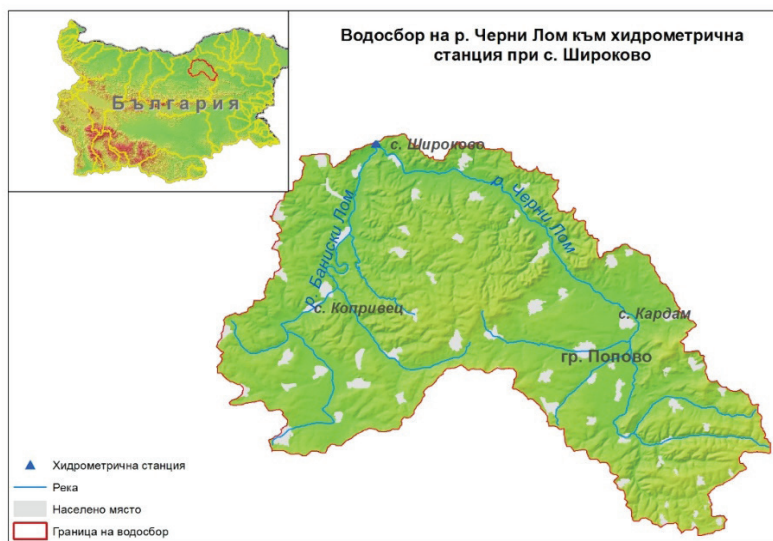


Fig. 1. Location of watershed of Cherni Lom river
Фиг. 1. Местоположение на водосборът на р. Черни Лом

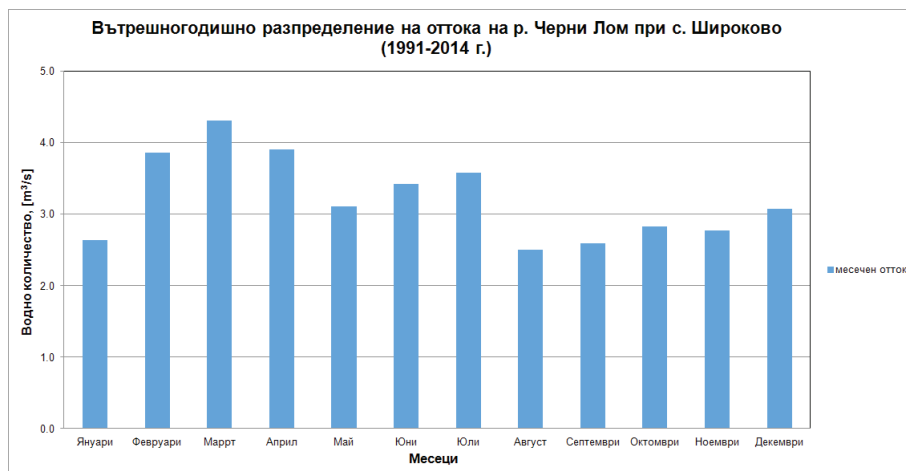


Fig. 2. Inter-annual distribution of the discharge at Shirokovo station
Фиг. 2. Вътрешно годишно разпределение на оттока на р. Черни Лом при с. Широково

2. МОДЕЛИРАЩА ПЛАТФОРМА

За моделираща платформа е избран NAM модулът на MIKE11 - софтуерен пакет, разработен от института "DHI Water&Environment", Дания. Модулът валеж-отток (NAM) е концептуален хидроложки модел със съсредоточени параметри. Подходящ е за водосбори до около 1000 km². За да се опишат хидроложките процеси в басейна, NAM модулът използва 4 резервоара, които задържат и разпределят водата от натрупания сняг, повърхностни води, води от кореновите системи и подземни води. Всички те представляват компонентите на хидроложкия цикъл (MIKE BY DHI, 2009). Този модул може да отчита и човешкия фактор в хидроложкия цикъл, чрез включване на модулите за напояване и изпомпване на води. Данните нужни за калибриране на модела са: осреднени за водосбора стойности на валеж, температура и потенциална евапотранспирация, както и водно количество в затварящия створ.

3. МЕТОДИ И ДАННИ

Използваните тук данни са оперативните данни за воден стоеж от 8 часа сутринта и съответстващото водно количество, определено по временни ключови криви за станция 31550 за периода Юни 2015 – Август 2020г. (фиг. 3). Другият тип данни, използвани тук, са симулираните водни количества с предварителност на прогностичните данни за валеж и температура за 1, 2, 3, 4 и 5 дни, както и с реално случили се валеж и температура (данни от анализ). Двойките симулирано-наблюдавано водно количество ще бъдат разпределени в няколко редици от данни, за които ще се приложат различни статистически критерии и ще бъдат направени различни изводи. Оценките ще бъдат направени освен за цялата редица на разглеждания период и на годишна, сезонна и месечна база.

За настоящето изследване сезоните пролет, лято, есен и зима започват съответно на 21 март, 21 юни, 21 септември и 21 декември, а при формирането на годишните оценки е използвана календарна година, а не хидроложка такава. Последното е поради факта, че за периода на изследването липсва съществена снежна покривка през месеците ноември и декември. Вследствие на това имаме несъществен принос на снеготопенето към прехвърлянето на отток във водосбора от една в друга календарна година.



Fig. 3. Observed and simulated discharge (with data from analysis) at Shirokovo station for the studied period

Фиг. 3. Наблюдавано и симулирано водно количество (с данни от анализ) при ст. Широково за изследвания период

4. МЕТОДИ ЗА ОЦЕНКИ НА ПРОГНОЗАТА

В литературата има различни видове оценки (Welles et al., 2007; Laio & Tamea, 2007; Franz & Hogue, 2011; NOAA NWS Report, 2006; Murphy & Epstein, 1988), които най-общо могат да бъдат разпределени в 7 категории:

- разпределения;
- достоверност на прогнозата;
- корелация;
- категорийна статистика;
- точност;
- доверителен интервал;
- верификация.

Оценката на хидрологичните прогнози има три основни цели: Първо, да се оцени количествено точността на прогнозата. Второ, да се оцени колко добре информацията се съобщава на потребителите на прогнозите. И трето, да се оцени полезността на прогнозата в контекста на въздействието върху конкретен потребител.

Това изследване ще се фокусира върху първата от тези три цели: количествено определяне на точността на прогнозата. Това обикновено се нарича верификация на прогнозата. На фигура 4 са показани прогнозни водни количества (червена линия) от 6 март 2018 година заедно с наблюдаваните водни количества (синя линия).

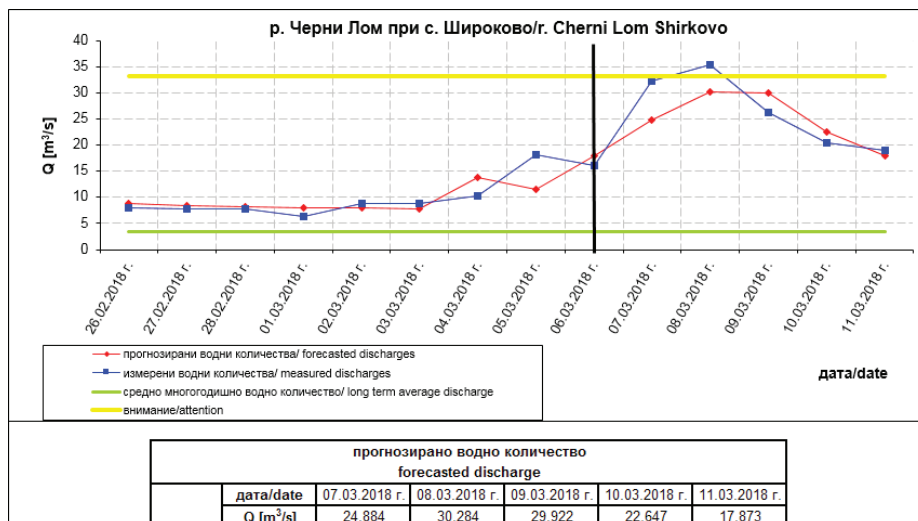


Fig. 4. Forecasted (red line for the period 7-11 March 2018) and observed (blue line 26 February – 11 March 2018) discharge at station Shirokovo

Фиг. 4. Прогнозирано (червена линия за периода 7 до 11 март 2018) и наблюдавано (синя линия за периода 26 февруари 11 март 2018) водно количество при ст. Широково

Основни причини за извършване на проверка на прогнозата са:

- да се наблюдава качеството на прогнозата, което означава да се определи съответствието между прогнозите и наблюденията;
- за подобряване на качеството на прогнозата чрез изучаване на силните и слабите страни на системата за прогнози;
- за да може да се сравни една прогнозна система с друга.

Точността се дефинира с това колко добре съвпадат наблюдаваните и прогнозните стойности. Статистиката на точността е мярка за грешка в прогнозата. Оценката на точността на прогнозата ще бъде представена със следните статистически критерии:

Средна грешка (ME)

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (Qf_k - Qo_k) \quad (1)$$

Средна абсолютна грешка (MA)

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |Qf_k - Qo_k| \quad (2)$$

Средна квадратична грешка (RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (Qf_k - Qo_k)^2} \quad (3)$$

Корелация (CC)

$$CC = \frac{\sum_{k=1}^N (Qo_k - \overline{Qo}) \overline{Qf_k - \overline{Qf}}}{\sqrt{\sum_{k=1}^N (Qo_k - \overline{Qo})^2 \sum_{k=1}^N (Qf_k - \overline{Qf})^2}} \quad (4)$$

Коефициент на Nash-Sutcliffe (NSC)

$$NSC = 1 - \frac{\sum_{k=1}^N (Qo_k - Qf_k)^2}{\sum_{k=1}^N (Qo_k - \overline{Qo})^2} \quad (5)$$

където,

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

Qf_k - прогнозирано водно количество в k -тия ден [m^3/s];

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

N - брой на дните в изследвания период.

Диапазонът на изменение на отделните критерии е както следва:

За ME - $-\infty$ до $+\infty$ като при 0 е перфектния случай;

За MAE – от 0 до $+\infty$ като при 0 е перфектния случай;

За RMSE – от 0 до $+\infty$ като при 0 е перфектния случай;

За CC – от -1 до $+1$ като $+1$ е перфектния случай;

За NSC - $-\infty$ до $+1$ като $+1$ е перфектния случай.

Друг вид статистическа оценка, която ще се използва е т. нар. дихотомна (бинарна) статистика (статистика на алтернативните стойности). Тази статистика попада в категорийната група и е представена в Таблица 2. Тя се използва за описване на разпределението на прогнозите и наблюденията по отношение на тяхната честота за различните категории, в случая водни количества над/под средната стойност за съответната извадка от данни.

Table 2 Table view of the dichotomous statistics

Таблица 2 Табличен вид на дихотомна статистика

		Наблюдаван отток		
		$Q \geq Q_{av}$	$Q < Q_{av}$	
Прогнозиран отток	$Q \geq Q_{av}$	ПОПАДЕНИЯ (A)	ФАЛШИВИ АЛАРМИ (B)	A + B
	$Q < Q_{av}$	ПРОПУСКИ (C)	КОРЕКТНИ ОТРИЦАТЕЛНИ (D)	C + D
		A + C	B + D	

„А“ показва броя на наблюдаваните водни количества над средната стойност, за които е било правилно прогнозирано, или попадения. „В“ показва броя на наблюдаваните водни количества под средната стойност, за които е неправилно прогнозирано, или фалшиви аларми. „С“ показва броя на наблюдаваните водни количества над средната стойност, за които се прогнозира, че са под нея или пропуски. „D“ показва наблюдаваните водни количества под средната стойност, за които е правилно прогнозирано, или коректно отрицателни. „А + С“ и „В + D“ са съответно общите наблюдавани водни количества над и под средната стойност; „А + В“ и „С + D“ са общите прогнозни водни количества над и съответно под средната стойност.

Някои от най-използваните критерии за оценка чрез дихотомната статистика са:

$$POD = (A / (A + C)) \quad (6)$$

$$POFD = (B / (B + D)) \quad (7)$$

$$FAR = (B / (A + B)) \quad (8)$$

$$CSI = (A / (A + B + C)) \quad (9)$$

където,

POD - Probability of detection - Представява делът на наблюдаваните водни количества над средната стойност, за които се прогнозира че са над средната стойност;

POFD - Probability of false detection – Представява делът на наблюдаваните водни количества под средната стойност, за които се прогнозира че са над средната стойност;

FAR - False Alarm Ratio - Представява делът на прогнозни водни количества над средната стойност, които са се случили да са под средната стойност;

CSI - Critical Success Index - Представява делът на наблюдаваните водни количества над средната стойност от общия брой на случили се и прогнозираните водни количества над средната стойност.

Диапазонът на изменение и на четирите критерия е от 0 до 1, като за POD и CSI в перфектния случай стойността е 1, а за FAR и POFD - тя е 0.

5. РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЯ

В Таблица 3 и фигури от 5 до 14 са показани статистическите резултати за целия период, по месеци - фигури 5 до 8, по сезони – фигури 9 до 11, и по години фигури 12 до 14.

Table 3 Statistical estimates for the whole period of the simulations with lead time up to 5 days and data from the analysis.

Таблица 3 Статистически оценки на симулациите за целия период с предварителност на прогнозните данни до 5 дни и с данни от анализа.

Статистическа оценка	Предварителност на прогнозата					Анализ
	5 дена	4 дена	3 дена	2 дена	1 ден	
ME	-1.275	-1.526	-0.559	0.475	0.258	0.531
MAE	1.639	1.927	1.373	1.488	1.452	1.255
RMSE	2.929	3.329	2.280	2.485	2.328	2.079
NSE	0.249	0.030	0.545	0.459	0.526	0.621
CC	0.627	0.493	0.756	0.728	0.755	0.820

Статистическа оценка	Предварителност на прогнозата					Анализ
	5 дена	4 дена	3 дена	2 дена	1 ден	
POD	0.339928	0.264388	0.561151	0.769784	0.681655	0.838129
CSI	0.329843	0.230047	0.486739	0.514423	0.465031	0.588384
FAR	0.082524	0.36087	0.214106	0.392045	0.405956	0.336182
POFD	0.012518	0.061119	0.062592	0.20324	0.190722	0.173785

От статистическите оценки за целия период е видно, че с отдалечаване на прогнозата от настоящия момент се намалява и точността ѝ, като най-лошите показатели са за 4ти и 5ти ден на прогнозата.

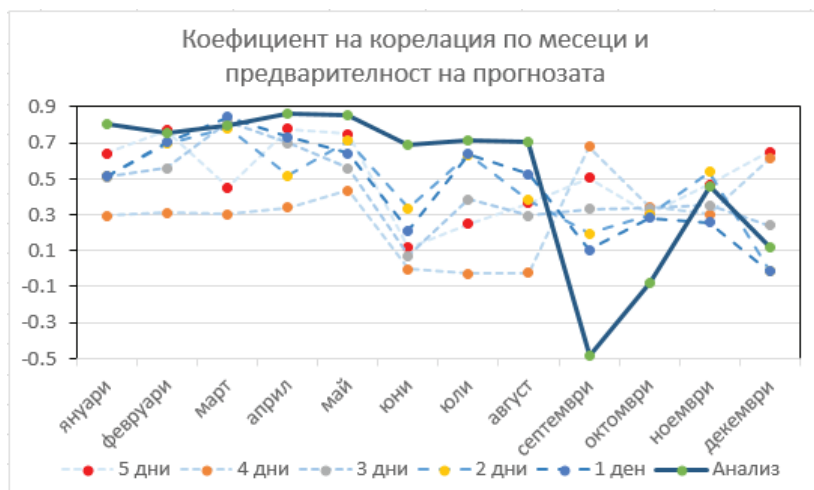


Fig. 5. Correlation coefficient by months and lead time up to 5 days

Фиг. 5. Коефициент на корелация по месеци и предварителност на прогнозата до 5 дни

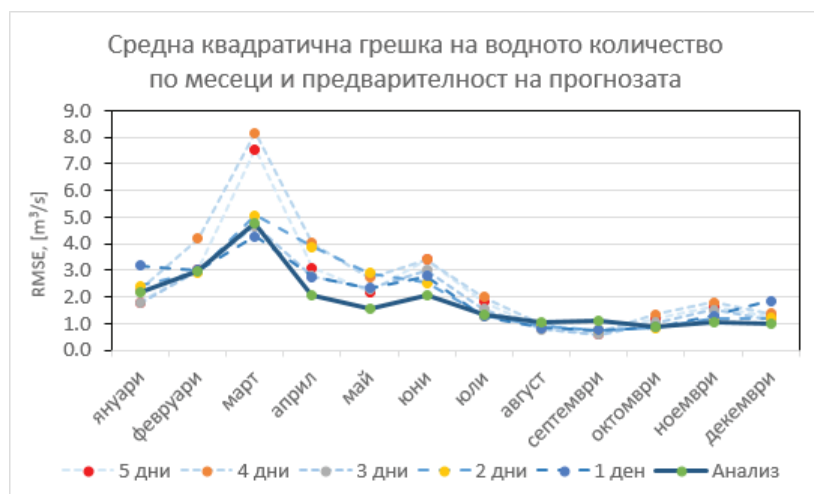


Fig. 6. RMSE by months and lead time up to 5 days

Фиг. 6. Средно квадратична грешка (RMSE) по месеци и предварителност на прогнозата до 5 дни

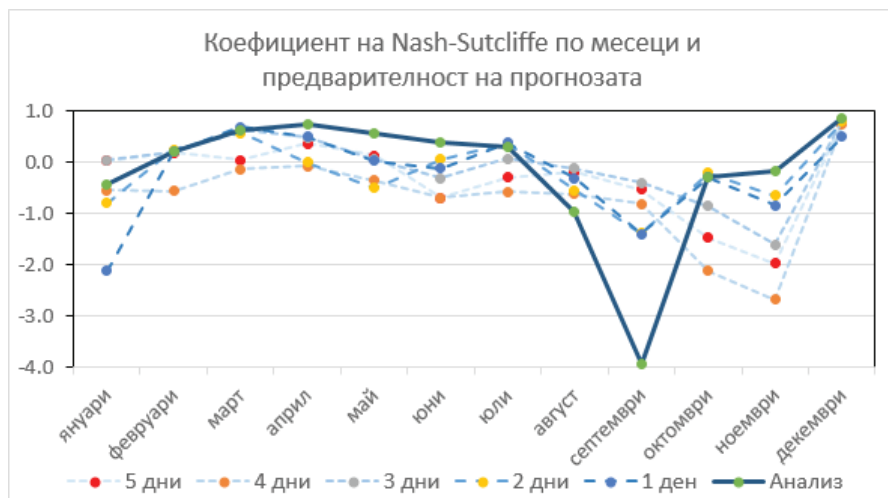


Fig. 7. NS coefficient by months and lead time up to 5 days

Фиг. 7. Коефициент на Nash-Sutcliffe по месеци и предварителност на прогнозата до 5 дни

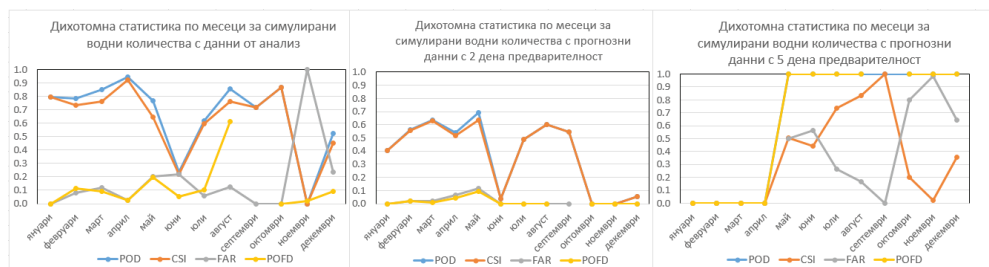


Fig. 8. Dichotomous statistics by months and for analysis and forecast with lead time of 2 and 5 days

Фиг. 8. Дихотомна статистика по месеци и анализ, 2 и 5 дни предварителност на прогнозата

От статистическите оценки по месеци се вижда, че колкото се приближаваме към настоящия момент, толкова по-точни стават прогнозите. Изключения правят месеците август, септември и октомври. По-лошите статистически оценки през тези месеци могат да бъдат обяснени с факта, че през месеците август и септември е периода на маловодие. В този период подхранването идва основно от подземен отток, който в модела е доста по-голям от действителния. През месец октомври статистическите оценки също не са толкова добри. Това се дължи на факта, че през този месец почвената влажност симулирана от модела е по-ниска от реалната

и образуваният повърхностен отток, вследствие на валежи, не е симулиран от модела поради спецификата на изчислителната схема.

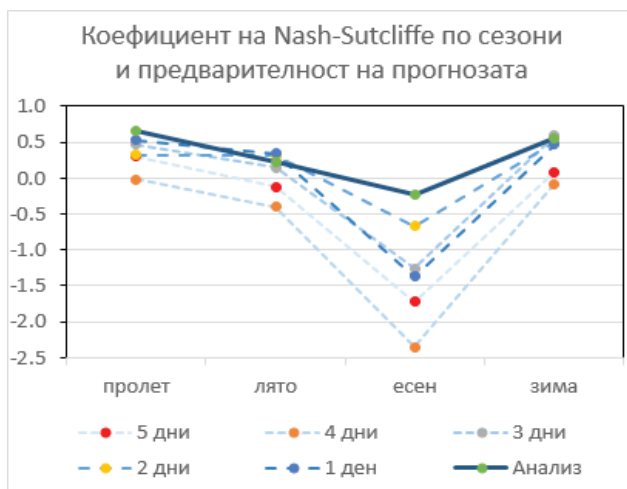


Fig. 9. NS coefficient by seasons and lead time of the forecast up to 5 days
Фиг. 9. Коефициент на Nash-Sutcliffe по сезони и предварителност на прогнозата до 5 дни

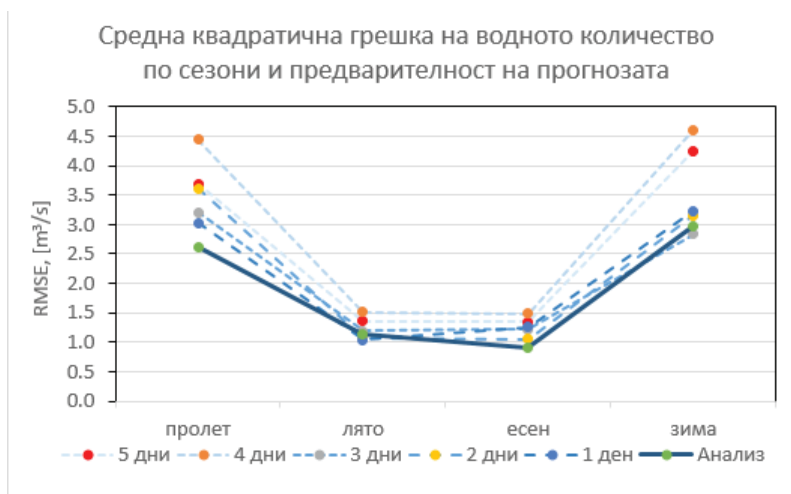


Fig. 10. RMSE by seasons and lead time of the forecast up to 5 days
Фиг. 10. Средно квадратична грешка (RMSE) по сезони и предварителност на прогнозата до 5 дни

Тук много ясно си личи, че в периода на пълноводие от февруари до май статистическите показатели са по-добри отколкото в останалия период. Това може да бъде обяснено с факта, че моделът се калибрира за високи води. Също така се вижда, че най-високите стойности на RMSE са през месец март. Това от своя страна показва, че по време на високите вълни преминавали през годините, моделните условия се отличават от реалните. Едно обяснение за този факт може да бъде наличието на карст и невъзможността на NAM модела точно да възпроизведе движението на подземните води.

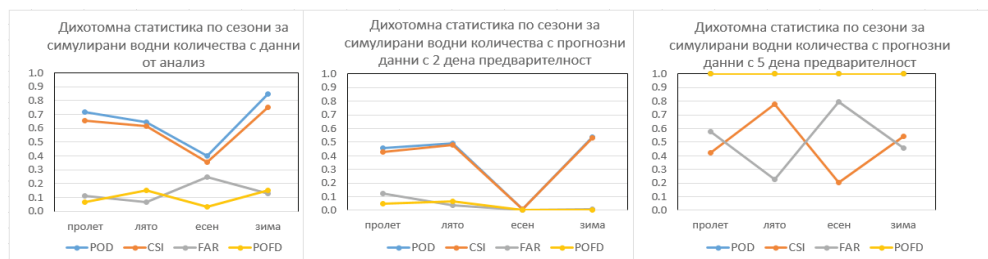


Fig. 11. Dichotomous statistics by seasons and for analysis and forecast with lead time of 2 and 5 days

Фиг. 11. Дихотомна статистика по сезони и анализ, 2 и 5 дни предварителност на прогнозата

При симулациите по сезони се вижда, че през периода на маловодие (лято и есен) статистическите оценки са по-лоши, в сравнение с периода на пълноводие (зима и пролет).

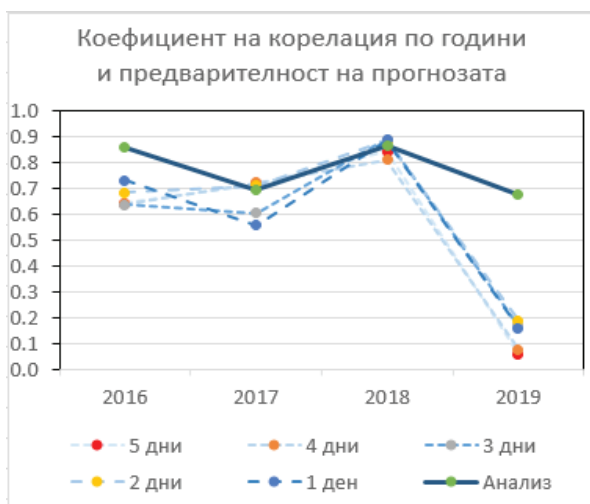


Fig. 12. Correlation coefficient by years and lead time up to 5 days

Фиг. 12. Коефициент на корелация по години и предварителност на прогнозата до 5 дни

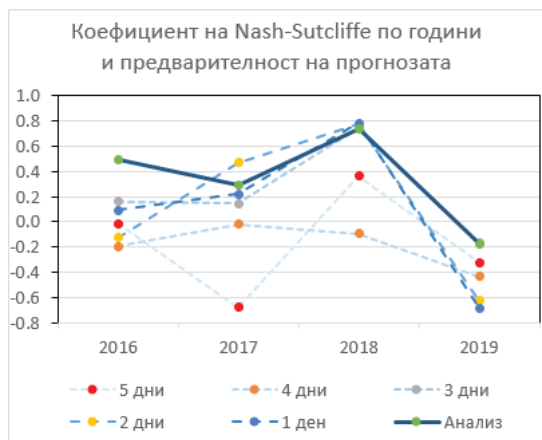


Fig. 13. NS coefficient by years and lead time up to 5 days

Фиг. 13. Коефициент на Nash-Sutcliffe по години и предварителност на прогнозата до 5 дни

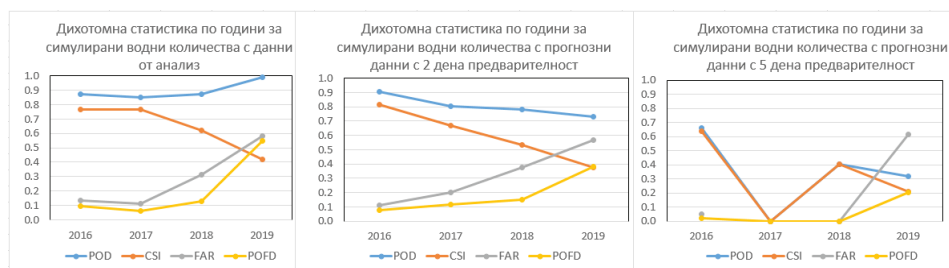


Fig. 14. Dichotomous statistics by years and for analysis and forecast with lead time of 2 and 5 days

Фиг. 14. Дихотомна статистика по години и анализ, 2 и 5 дни предварителност на прогнозата

При симулациите по години се вижда че през 2016 и 2018 година оценките са по-добри в сравнение с останалите 2 години. Една от причините за това е, че през тези две години средногодишното водно количество е по-голямо с 60 до 80 % от средното многогодишно водно количество. Тук отново се наблюдава тенденция, колкото предварителността на прогнозата нараства, толкова по-лоши да са статистическите показатели.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Без провеждането на непрекъсната и всеобхватна проверка на резултатите е невъзможно да се знае какво трябва да се промени, за да се подобри точността

на прогнозата и уменията на прогнозиста да акцентира върху важността на даден елемент от прогнозата. Такива проверки трябва да се извършват периодично за периодите на наводнение. Дали прогнозата е „добра“ може да означава различни неща за различните потребители и в различни ситуации.

От показаните резултати в настоящето изследване се вижда, че през периоди с ниски води резултатите са по-лоши в сравнение с периодите на високи води. Както беше споменато една възможна причина за това е, че моделът е калибриран за високи води. Друга възможна причина е малкият период на наблюдения. В този смисъл, за да се получат надеждни статистически оценки е необходим голям брой двойки данни симулирани-наблюдавани.

Друг възможен подход е оттока да се раздели в категории (Franz & Hogue, 2011) (например: ниски води, средни води, високи води, наводнения) и за всяка категория да се направят статистически оценки и верификация, което ще бъде предмет на следващи изследвания.

БЛАГОДАРНОСТИ

Благодарности за финансовата подкрепа на Национална програма “Млади учени и постдокторанти” към Министерство на образованието и науката (МОН) по Решение на МС No 577/17.08.2018 г.

ЛИТЕРАТУРА

- Franz, K. J., & Hogue, T. S. (2011). Evaluating uncertainty estimates in hydrologic models: borrowing measures from the forecast verification community. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15 (11), 3367.
- Laio, F., & Tamea, S. (2007). Verification tools for probabilistic forecasts of continuous hydrological variables. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11 (4), 1267-1277.
- MIKE BY DHI (2009). MIKE11. A modelling System for rivers and channels. User Guide. DHI Water and Environment (DHI), Denmark.
- Murphy, A. H. & Epstein, E. S. (1989). Skill scores and correlation coefficients in model verification. *Mon. Weath. Rev.*, 117, 572-581.
- NOAA NWS – report of the Hydrologic Verification System Requirements Team, October, 2006 (www.nws.noaa.gov/oh/rfcdev/docs/Final_Verification_Report.pdf)
- Welles, E., Sorooshian, S., Carter, G., & Olsen, B. (2007). Hydrologic verification: A call for action and collaboration. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88 (4), 503-512.
- Кошинчанов, Г. (2016). Хидроложко и хидравлично моделиране на избрани поречия за нуждите на изграждане на системи за ранно предупреждение от наводнения, Дисертационен труд, НИМХ, София 2016.