

SROVNANÍ ČASOVÝCH ŘAD VÝPARU NAMĚŘENÉHO VÝPAROMĚREM GGI-3000 A VYPOČÍTANÉHO PODLE METODIKY FAO

Gražyna Knozová
Jaroslav Rožnovský
Mojmír Kohut

Summary:

Comparison of evaporation time series measured by evaporimeter GGI-3000 and that calculated by the FAO method

Evaporation is a very complicated physical process, and therefore its quantification is difficult. In the network of the Czech Hydrometeorological Institute (CHMI), various methods have been used, but for many studies and evaporation determination, calculation methods are used. It is our aim in this contribution to determine the relationship between the time series of evaporation from water surface calculated by the standard method according to FAO, with data series measured with the help of the evaporimeter GGI-3000, which for a long time has been the basic apparatus measuring evaporation in the CHMI meteorological station network. Daily data from eight stations in the Czech Rep. have been compared, and the presented conclusions have been gained from the regression analysis between measured and calculated series, and from the statistical analysis of the differences of the daily evaporation values. It has been shown, that the value of evaporation from water surface calculated according to empirical formula usually exceeds the measured value, namely by 0.8 mm on average, and in quite extraordinary cases even by up to 6.9 mm. The course of the measured data as compared to the calculated ones exhibits a greater variability, and therefore, correlation between the series are not close, namely the correlation coefficient has the value of 0.70. It has been verified, that the gained results can be used to supplement data which are missing in series of measurement by evaporimeter GGI-3000 in the period of 1971-2000 in the quoted stations, and during further processing.

Key words: evaporation, evaporimeter GGI-3000, calculation methods, statistical analysis

Abstrakt:

Výpar je velmi složitý fyzikální proces, a proto je jeho kvantifikace obtížná. V síti ČHMÚ byly používány různé metody měření, ale pro mnohé studie a stanovení výparu jsou využívány výpočetní metody. Naším cílem v tomto příspěvku je určení vztahu mezi časovými řadami výparu z vodní hladiny, vypočítaného modifikovanou standardní metodou podle FAO, s řadou dat naměřených pomocí výparoměru GGI-3000, který byl dlouhá léta základním přístrojem měřícím výpar v síti meteorologických stanic ČHMÚ. Srovnávány byly denní údaje z osmi stanic v ČR a předložené závěry byly získány z regresní analýzy mezi naměřenými a vypočítanými řadami a ze statistické analýzy rozdílů denních hodnot výparu. Prokázalo se, že hodnoty výparu z vodní hladiny vypočítané podle empirického vzorce obvykle přesahují hodnotu naměřenou, a to průměrně o 0,8 mm, ve zcela mimořádných případech dokonce až o 6,9 mm. Průběh naměřených dat vykazuje oproti vypočteným větší variabilitu, a tím je dáno, že korelace mezi řadami nejsou vysoké, koeficient korelace má hodnotu 0,70. Bylo ověřeno, že získané výsledky lze použít k doplnění údajů chybějících v řadách měření výparoměrem GGI-3000 v období 1971-2000 na uvedených stanicích při dalších zpracováních.

Klíčová slova: evaporace, výparoměr GGI-3000, metody výpočtu, statistické analýzy

1. Úvod

Výpar je jednou ze základních složek oběhu vody v přírodě. Jde o složitý fyzikální proces, který probíhá na všech vlhkých površích v závislosti na množství dostupné energie k výparu. Vliv mají fyzikální vlastnosti povr-

chu, radiační bilance slunečního záření daná jeho transformací na tomto povrchu, vlhkost a proudění vzduchu, rostlinný pokryv apod. Tato složitost procesu výparu je příčinou, proč na rozdíl od mnoha meteorologických prvků je měření výparu svým způsobem stále problémové. V naší síti meteorologických stanic,

tedy v síti Českého hydrometeorologického ústavu (dále jen ČHMÚ), probíhalo měření výparu z vodní hladiny pomocí několika přístrojů. U všech byly časem zjištěny určité nedostatky, které ovlivnily celkové hodnoty výparu. V současné době je na klimatologických stanicích nejvíce zastoupen výparoměr GGI-3000 (SLABÁ, 1972, FIŠÁK, 1994).

S ohledem na náročnost měření výparu a jeho určité nedostatky jsou v současné době více používány vzorce pro výpočet výparu z různých povrchů, hlavně potom z povrchu rostlin, tedy evapotranspirace (ALLEN et al. 1989, 1998). ALLEN a PRUITT (1991) ve své práci podrobně rozebírají metodiku FAO. Výpočet referenční evapotranspirace podrobně rozebral KOHUT (2005). Všechny tyto práce vycházejí ze zásad pro výpočet evaporace a evapotranspirace, které položil PENMAN (1948). Jeho metoda byla v teoretické oblasti dále rozpracována (MONTEITH, UNSWORTH, 1990, BRUTSAERT, 1982). Modifikovaná metoda podle Penmana je základem pro různé postupy určení závlahových dávek (BOS et al., 1996, DOORENBOS, PRUITT,

1977). Podrobný přehled o metodách výpočtu výparu vypracoval NOVÁK (1995). V rámci agroklimatologického hodnocení území Československa, byla použita prof. J. Tomlínem pro výpočet ukazatele zavlažení metoda výpočtu potenciální evapotranspirace podle Budyka (KURPELOVÁ et al., 1975).

2. Metodika a zdrojová data

Základní soubor údajů pochází z databáze ČHMÚ. Jsou to denní hodnoty výparu, naměřené výparoměrem GGI-3000 v období květen až září 1971-2000, a to na osmi meteorologických stanicích, reprezentujících různé části území České republiky. Řady dat nejsou kompletní. Nejméně údajů chybí na stanici v Kostelní Myslové (pouze jediný údaj), zatímco nejvíce (7,9 %) v Chebu, kde bylo měření ukončeno v roce 1998 (tab. 1).

Druhý soubor uvádí data ze stejného období květen až září 1971-2000. Hodnoty výparu jsou vypočítány modifikovanou metodou podle FAO:

$$E_o = \frac{p_o * \Delta * \left[0,95 * R_A * \left(0,18 + 0,55 \frac{n}{D} \right) - \sigma * T^4 * \left(0,56 - 0,079 * \sqrt{e_d} \right) * \left(0,1 + 0,9 * \frac{n}{D} \right) \right] + 0,26 * (e_s - e_d) * (0,50 + 0,54 * u)}{1 + \frac{p_o * \Delta}{p * \gamma}}$$

kde: p_o, p = barometrický tlak na hladině moře a na daném místě [kPa],
 Δ = změna tlaku nasycených par v závislosti na teplotě [kPa.°C⁻¹],
 γ = psychrometrická konstanta [kPa.°C⁻¹],
 R_A = krátkovlnné dopadající záření [cal.cm⁻².den⁻¹],
 n = sluneční svit [hod.],
 D = maximálně možný sluneční svit [hod.],
 σ = Stefan-Boltzmanova konstanta [W.m⁻².°K⁻⁴],
 T = teplota vzduchu [°K],
 e_d, e_s = skutečný tlak vodních par a tlak nasycených vodních par [kPa],
 u = rychlost větru [m.s⁻¹].

Pro šest stanic byl výpočet získán na základě měřených meteorologických prvků, zatímco pro dvě zbývající stanice byly z technických důvodů použity hodnoty vypočítané na nejbližších sousedních stanicích. Časová řada výparoměrných dat naměřená v Holovousích byla srovnána s vypočítanou řadou pro stanici Hradec Králové vzdálenou 20 km a naměřené údaje v

Kroměříží byly srovnány s vypočítanými údaji pro stanici Holešov vzdálenou 15 km.

Základní metodou zpracování byla analýza běžných statistických ukazatelů. Chybějící údaje byly doplněny pomocí funkce lineární regrese mezi naměřenou a vypočítanou řadou.

Tab. 1 Základní údaje o měření a výpočtu zpracovávaných řad výparu

Klimatologická stanice	Nadmořská výška [m]	Zeměpisná šířka	Zeměpisná délka	Chybějící data [%]
Doksany	158	50°27'31''	14°10'14''	1,1
Holovousy	321	50°22'29''	15°34'38''	7,4
Cheb	471	50°04'26''	12°23'20''	7,9
Kostelní Myslová	569	49°09'36''	15°26'21''	0,0
Kroměříž	235	49°17'09''	17°21'47''	0,5
Kuchařovice	334	48°52'57''	16°05'11''	0,9
Praha-Libuš	303	50°00'30''	14°26'53''	2,4
Svratouch	737	49°44'06''	16°02'01''	1,0

3. Výsledky a diskuse

3.1. Srovnání naměřených a vypočítaných hodnot výparu

Meteorologické stanice, z kterých pocházejí zpracovávané údaje o výparu, leží v různých částech České republiky (tab. 1). Rozdílné podmínky geografického prostředí ovlivňují zásadní rozdíly ve velikosti a charakteru výparu.

Nejnižší dlouhodobé hodnoty měřeného výparu se vyskytují na stanicích, umístěných ve vyšších nadmořských výškách, tj. ve Svratouchu (denní průměr 2,1 mm) a v Chebu (denní průměr 2,2 mm), viz tab. 2, což je způsobeno relativně nižší teplotou vzduchu a čtenějším výskytem větru, resp. vyššími rychlostmi proudění vzduchu. Nejvyšší dlouhodobý výpar je pozorován v jižní části Moravy, kterou reprezentuje stanice v Kuchařovicích, kde v teplém období roku se dlouhodobě průměrně vypařuje 3,2 mm za den. Jen o něco nižší hodnoty jsou zaznamenány na stanicích položených v městských oblastech, tedy v Kroměříži a v Praze-Libuši. Je to způsobeno jednak menší nadmořskou výškou těchto míst, jednak vlivem městského tepelného ostrova.

Analogické výsledky přináší analýza plošného rozložení průměrného denního výparu, vypočítaného podle metodiky FAO, nicméně zaznamenané hodnoty jsou v tomto případě vyšší a pohybují se v rozsahu od 3,0 mm (Cheb) do 3,7 mm (Kuchařovice), viz tab. 3. Rozptyl denních hodnot výparu, vyjádřený dolním a horním kvartilem, je přitom ve vypočítaných řadách větší než v případě řad naměřených.

Při srovnání extrémních hodnot výparu, vyskytujících se v obou řadách, docházíme k následujícím rozdílům. Při analýze nejvyšších hodnot zjišťujeme jistou vazbu na nadmořskou výšku: u stanic s menší nadmořskou výškou (Doksany, Kuchařovice, Praha-Libuš) jsou výrazně vyšší extrémy měřených řad (až o 2 mm), naopak u stanic, které leží ve vyšších nadmořských výškách (Cheb, Kostelní Myslová, Svratouch), je tomu opačně (extrémy vyšší u vypočítaných řad), avšak vzájemný rozdíl je podstatně menší (do 1 mm). U nejnižších hodnot je situace jednodušší. Extrém ve vypočítaných řadách je vždy vyšší než extrémní údaj v měřených řadách, přičemž vzájemný rozdíl je do 0,7 mm.

Nejvyšší denní výpar byl naměřen v Kuchařovicích dne 5. srpna 1978 a činil 10,7 mm (tab. 2). Na druhé straně ovšem ani omezení výparu na nulovou hodnotu není v naměřených řadách ojedinělým jevem. V řadách vypočítaných je rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší hodnotou denního výparu výrazně nižší, častěji u stanic ležících v nižších nadmořských výškách (Doksany, Kuchařovice, Praha-Libuš). Z dostupných údajů byl nejvyšší denní výpar vypočítán pro Holešov, a to 9,6 mm. V předkládaném zpracování je tato řada srovnávána s daty naměřenými v 15 km vzdálené Kroměříži, kde denní maximum naměřeného výparu dosáhlo stejné hodnoty. Po srovnání maxim ostatních datových řad nelze říci, že nejvyšší hodnoty kterékoli řady pravidelně přesahovaly analogické údaje druhé řady. Zároveň je třeba se zmínit, že extrémy se nevyskytují současně v obou řadách – například nejvyšší vypočítaný denní výpar ve zmíněných Kuchařovicích byl dne 24. května 1979, a to 8,8

mm a byl tak o 1,9 mm nižší oproti naměřenému. V případě nejmenších hodnot denního výparu, jak už bylo uvedeno, měření na jednotlivých stanicích vykazuje 0 až 0,2 mm, zatímco

vypočet dává hodnoty na úrovni 0,6 až 0,7 mm. Četnost výskytu nejmenších hodnot vypočítaného výparu je menší než u výparu naměřeného.

Tab. 2 Statistické údaje o denním výparu naměřeném pomocí GGI-3000 (období V-IX, 1971-2000)

Klimatologická stanice	Dlouhodobý denní průměr	Dolní kvartil	Horní kvartil	Nejvyšší denní výpar	Nejnižší denní výpar
Doksany	2,72	1,7	3,5	9,7	0,0
Holovousy	2,39	1,6	3,1	7,2	0,2
Cheb	2,17	1,5	2,8	6,7	0,1
Kostelní Myslová	2,46	1,6	3,2	7,7	0,0
Kroměříž	2,83	1,8	3,7	9,6	0,0
Kuchařovice	3,16	2,1	4,0	10,7	0,1
Praha-Libuš	2,94	1,8	3,8	9,6	0,0
Svratouch	2,11	1,3	2,8	8,4	0,0

Tab. 3 Statistické údaje o denním výparu vypočítaném (období V-IX, 1971-2000)

Klimatologická stanice	Dlouhodobý denní průměr	Dolní kvartil	Horní kvartil	Nejvyšší denní výpar	Nejnižší denní výpar
Doksany	3,12	2,1	4,1	7,7	0,7
Hradec Králové	3,31	2,1	4,4	8,5	0,7
Cheb	3,00	1,9	3,9	7,1	0,7
Kostelní Myslová	3,29	2,1	4,3	8,0	0,7
Holešov	3,49	2,2	4,6	9,6	0,7
Kuchařovice	3,73	2,5	4,9	8,8	0,7
Praha-Libuš	3,47	2,3	4,5	7,6	0,7
Svratouch	3,25	2,0	4,3	9,3	0,6

Pro podrobnou charakteristiku odlišnosti obou srovnávaných skupin dat jsou vypočítány rozdíly hodnot výparu z každého dne. Získané výsledky ukazují, že vypočítaný výpar je zásadně vyšší než naměřený a že se liší v průměru od 0,4 mm (Doksany) do 1,1 mm (Svratouch), viz tab. 4. Extrémní rozdíly jsou ale vysoké. Záporná čísla svědčí o tom, že výpar vypočítaný v konkrétním dni přesahuje naměřenou hodnotu, zatímco kladná čísla svědčí o opaku. Nejširší meze odlišnosti se vyskytují v Kuchařovicích, kde se extrémní rozdíly pohybují v rozmezí od -5,2 mm do +6,9 mm. Nejvyšší záporný rozdíl byl však zaznamenán při

srovnání měření ze stanice Kroměříž s výpočtem z Holešova a činil -6,0 mm.

Jak vyplývá z výše uvedené statistické analýzy obou souborů dat, denní hodnoty naměřeného výparu vykazují větší proměnlivost. Průběhy obou řad jsou tedy rozdílné, a proto korelační koeficienty mezi nimi nejsou vysoké. Nejlepší korelaci (0,74) lze pozorovat mezi řadami z Chebu a také ze Svratouchu (tab. 4), kde, jak bylo zmíněno výše, jsou hodnoty nižší, zatímco nejslabší korelace (0,65) byla prokázána pro data z Kuchařovic, tj. na stanici s nejvyšším výparem.

Tab. 4 Statistické údaje o rozdílech a vazbách mezi denním výparem naměřeným pomocí GGI-3000 a výparem vypočítaným (V-IX, 1971-2000)

Klimatologická stanice	Průměrný rozdíl	Extrémní záporný rozdíl	Extrémní kladný rozdíl	Korelace s výpočtem
Doksany	-0,40	-3,9	5,4	0,707
Holovousy	-0,90* ¹	-5,6* ¹	4,0* ¹	0,675* ¹
Cheb	-0,82	-4,4	2,3	0,742
Kostelní Myslová	-0,83	-4,4	2,9	0,719
Kroměříž	-0,65* ²	-6,0* ²	4,8* ²	0,676* ²
Kuchařovice	-0,58	-5,2	6,9	0,647
Praha-Libuš	-0,52	-5,4	5,6	0,692
Svratouch	-1,13	-5,0	3,6	0,741

*¹ výpočet z Hradce Králové, *² výpočet z Holešova

3.2. Doplnování chybějících údajů výparu

Jedním ze zásadních problémů využití naměřených dat v klimatologických a bioklimatologických zpracováních je jejich nekompletnost. Důležitý je proto výběr vhodné metodiky doplnování chybějících údajů. V případě výparu je to úkol obzvláště těžký, a to vzhledem ke složitosti procesu a obtížnosti jeho vyhodnocování, nicméně předkládaná studie přináší určitý návrh rekonstrukce chybějících dat.

Na základě provedené analýzy v předchozí kapitole se autoři pokusili o výpočet hodnot výparu chybějících v naměřené řadě, a to využitím metod lineární regrese. Korelační výpočty proběhly mezi dvěma proměnnými, tj. mezi výparem naměřeným pomocí GGI-3000 (nezávisle proměnná) a výparem vypočítaným podle

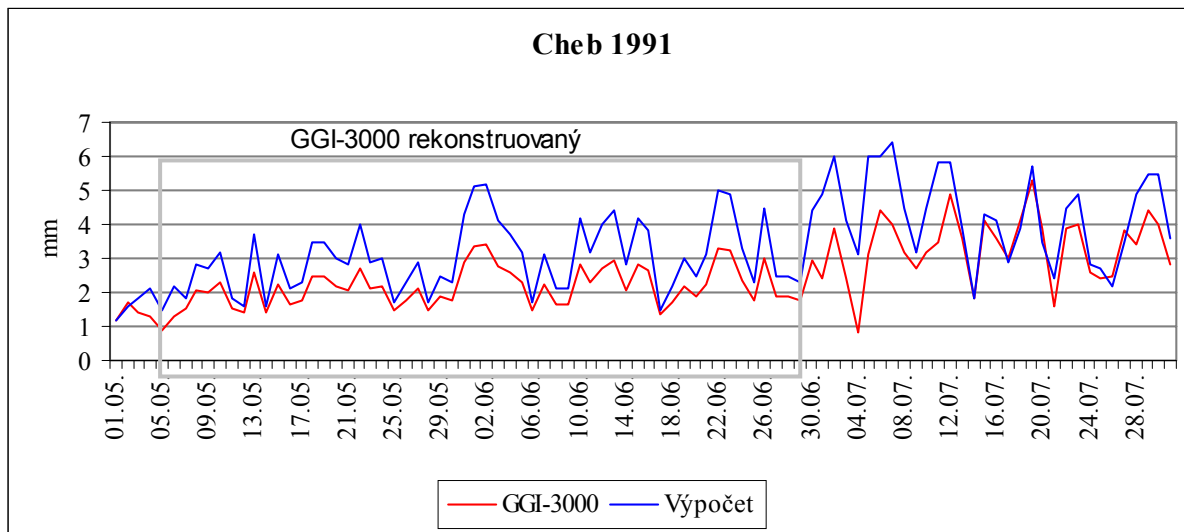
metodiky FAO (závisle proměnná). Dosažené výsledky lze považovat za dobré. Doplněné údaje v podstatě nezměnily charakteristiky původního souboru dat. Dlouhodobý denní průměr výparu vypočítaný na třech stanicích se zvětšil pouze o 0,01 mm a extrémní hodnoty na všech klimatologických stanicích zůstaly stejné (tab. 5). Ukazatele rozptylu hodnot jsou také ve většině případů totožné, pouze s výjimkou Prahy-Libuše, kde se dolní kvartil přesunul o 0,1 mm směrem vzhůru. Navíc korelace doplněné řady naměřeného výparu s řadou vypočítanou se téměř na všech stanicích zlepšily. Jen charakter průběhu rekonstruovaných řad výparu vykazuje malé změny, a to z důvodu mírného omezení variability nově vypočítaných údajů (obr. 1, obr. 2, obr. 3).

Tab. 5 Statistické údaje o doplněných řadách naměřeného výparu (V-IX, 1971-2000)

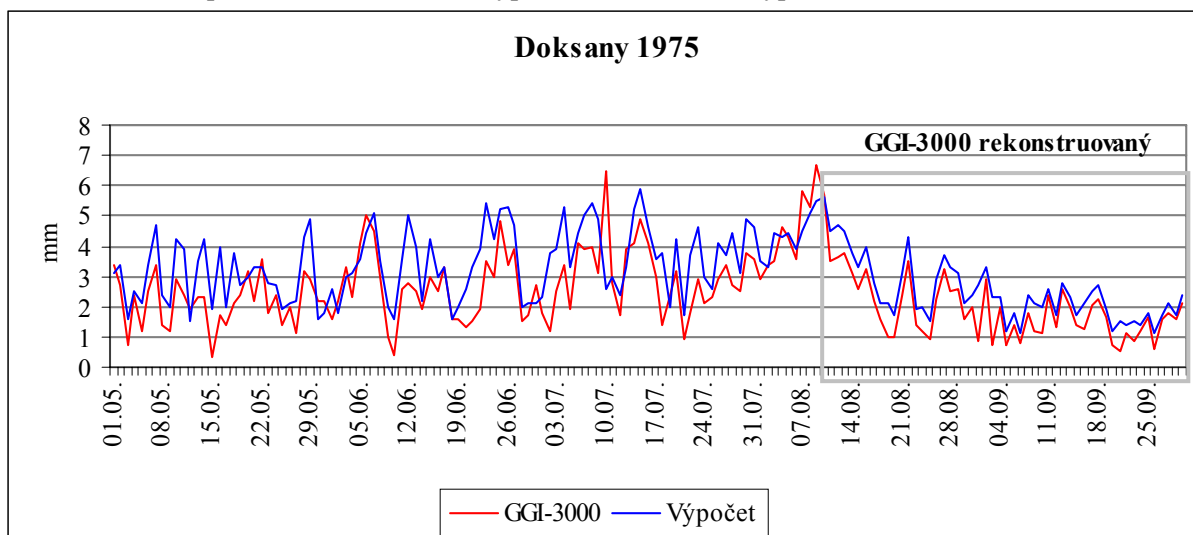
Klimatologická stanice	Dl. denní průměr	Dolní kvartil	Horní kvartil	Nejvyšší denní výpar	Nejnižší denní výpar	Korelace s výpočtem
Doksany	2,72	1,7	3,5	9,7	0,0	0,708
Holovousy	2,40	1,6	3,1	7,2	0,2	0,689* ¹
Cheb	2,18	1,5	2,8	6,7	0,1	0,755
Kostelní Myslová	2,46	1,6	3,2	7,7	0,0	0,719
Kroměříž	2,83	1,8	3,7	9,6	0,0	0,677* ²
Kuchařovice	3,15	2,1	4	10,7	0,1	0,650
Praha-Libuš	2,94	1,9	3,8	9,6	0,0	0,696
Svratouch	2,11	1,3	2,8	8,4	0,0	0,743

*¹ výpočet z Hradce Králové, *² výpočet z Holešova

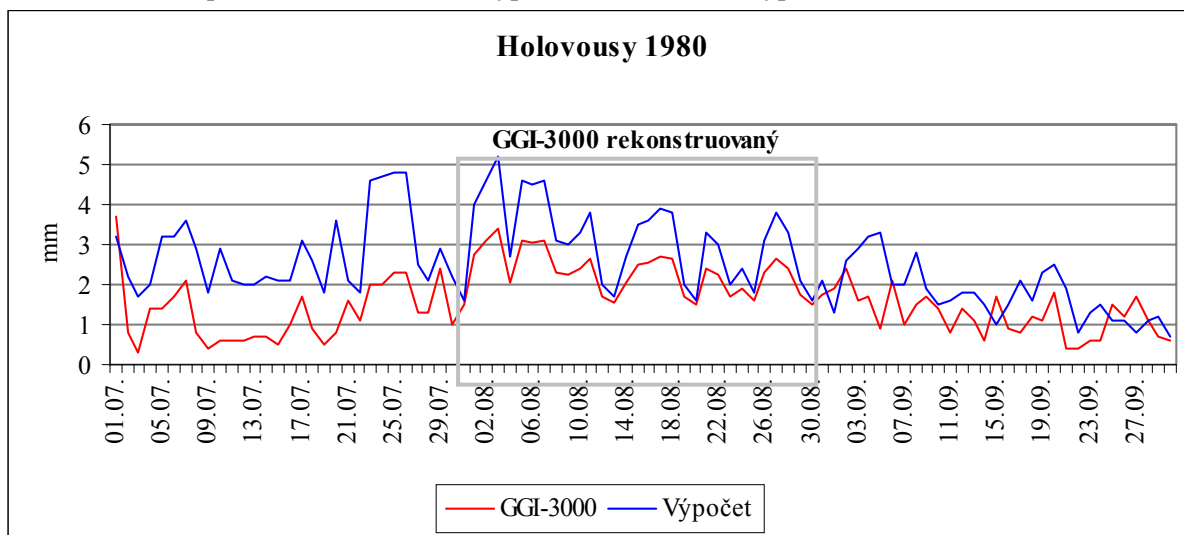
Obr. 1 Srovnání průběhu naměřeného a vypočítaného denního výparu v Chebu



Obr. 2 Srovnání průběhu naměřeného a vypočítaného denního výparu v Doksanech



Obr. 3 Srovnání průběhu naměřeného a vypočítaného denního výparu v Holovousích



4. Závěr

Stanovení výparu z vodní hladiny je velmi potřebné nejen pro hydrologické studie. S ohledem na určité obtíže při vyhodnocení vláhové bilance v krajině jsme prověřovali závislost mezi hodnotami naměřeného a vypočítaného výparu z vodní hladiny. Na klimatologických stanicích Českého hydrometeorologického ústavu již po mnoho desetiletí probíhá měření výparu výparoměrem GGI-3000. Na druhé straně je mnoho vzorců, kterými je výpar vypočítáván. Pro tuto studii jsme vyšli z našich dosavadních zkušeností a pro výpočet výparu z vodní hladiny jsme použili postupy výpočtu podle metodiky FAO. Protože v řadách měření dochází k výpadkům a je nutné doplňovat chybějící údaje, provedli jsme srovnání řady naměřených a vypočítaných dat za roky 1971-2000 a pro období květen až září, které je hlavním

obdobím pro měření výparu výparoměrem GGI-3000.

Provedené srovnání řad výparu denních úhrnů přineslo několik důležitých výsledků. Ukázalo, že denní hodnoty vykazují obdobnou dynamiku, ovšem hlavně v extrémních hodnotách mezi oběma řadami existují dosti výrazné rozdíly. Průběh naměřených dat charakterizuje větší variabilita, a proto korelace mezi oběma řadami nejsou vysoké, korelační koeficient průměrně dosahuje 0,70. Výpar vypočítaný podle empirického vzorce podle FAO obvykle přesahuje hodnotu naměřenou, a to v dlouhodobém průměru o 0,8 mm, v extrémním případě dokonce o 6,9 mm.

Přes výše uvedené poznatky jsme došli k závěru, že je možná rekonstrukce hodnot denního výparu, chybějících v naměřených řadách, a to využitím řad výparu vypočítaných podle metodiky FAO.

5. Literatura

- ALLEN R.G., JENSEN M.E., WRIGHT J.L., BURMAN R.D.: Operational estimates of evapotranspiration. *Agronomy Journal*, 81(4), pp. 650-662, 1989.
- ALLEN R.G., PEREIRA L.S., RAES D., SMITH M.: Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. Food and Agriculture Organization, FAO Irrigation and Drainage Papers No. 56, pp. 301, Rome 1998.
- ALLEN R.G., PRUITT W.O.: FAO-24 reference evapotranspiration coefficients. *Journal Irrig. And Drainage Engineering*, ASCE 117(5), pp. 758-773, 1991.
- BOS M.G., VOS J., FEDDES R.A.: CRIWAR 2.0. A simulation model on Crop Irrigation Water Requirements. ILRI publication 46, pp. 117, Wageningen 1996.
- BRUTSAERT W.: Evaporation into the Atmosphere. D.Reidel Publishing Co., pp. 299, Dordrecht 1982.
- BURMAN R., POCHOP L.O.: Evaporation, Evapotranspiration and Climatic Data. Elsevier Science B.V., pp. 275, Amsterdam 1994.
- DOORENBOS J., PRUITT W.O.: Guidelines for Predicting Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 24, 2nd ed. FAO, pp. 156, Rome 1977.
- FIŠÁK, J.: Návod pro pozorovatele meteorologických stanic, Metodický předpis ČHMÚ č. 11, ČHMÚ, 1994, 3. přepracované vydání, 115 s., 8 fotografií, 22 pérovek, 5 příloh.
- KOHUT, M.: Referenční evapotranspirace. In: Rožnovský, J., Litschmann, T. (red) Evaporace a evapotranspirace. Česká bioklimatologická společnost, Brno, 2005
- KURPELOVÁ, M., COUFAL, L., ČULÍK, J.: Agroklimatické podmienky ČSSR. Hydrometeorologický ústav, Bratislava 1975, 270 s.
- MONTEITH J.L., UNSWORTH M.H.: Principles of Environmental Physics, Edward Arnold, 2nd ed., pp. 291, London 1990.
- NOVÁK V.: Vyparovanie vody v prírode a metódy jeho určovania. SAV, Bratislava 1995, 260 str.
- PENMAN H.L.: Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. R. Soc. A*, 193, pp. 120-145, 1948.
- SLABÁ, N. Návod pro pozorovatele meteorologických stanic ČSSR, Sborník předpisů, sv. 7, Hydrometeorologický ústav, 1972, 2. přepracované vydání, 224 stran, 55 obrázků, 21 příloh.



Foto 1 Výparoměrná souprava GGI-3000 v Holovousích (AMET Velké Bílovice)



Foto 2 Detail výparoměru GGI-3000 v Holovousích (AMET Velké Bílovice)



Foto 3 Výparoměrná souprava GGI-3000 v Kuchařovicích (AMET Velké Bílovice)