PRIESTOROVÉ ROZLOŽENIE PRIEMERNÝCH EFEKTÍVNYCH ZRÁŽOK NA ÚZEMÍ SLOVENSKA

SPATIAL DISTRIBUTION OF MEAN EFFECTIVE PRECIPITATION OVER SLOVAKIA

Jaromír Švasta a Peter Malík

ABSTRACT

In this study, the evaluation of effective precipitation by means of geostatistical analysis of meteorological stations over the territory of Slovakia for the period 1951-1980 is presented. The method of residual kriging with removed global trend was used to estimate mean monthly and annual air temperatures and precipitation totals. Stepwise regression was applied to observe trends in the geographic position as well as in the local geomorphology. Verification of the results proved that the geomorphology method is well capable of reproducing observations. For the sake of mean potential evapotranspiration evaluation, the Thornthwait's (1948, 1955) method with monthly calculation steps was used. The results gained were subsequently entered into the calculation of actual (real) monthly evapotranspiration, where the response of precipitation totals and potential evapotranspiration to the change in soil water content was examined, which determines the real quantity of water evaporated from the surface. The outcome is the presented map of effective precipitation, calculated by subtracting actual (real) evapotranspiration from precipitation totals.

KEY WORDS

effective precipitation, potential evapotranspiration, actual evapotranspiration, geostatistics, Slovakia

KLÚČOVÉ SLOVÁ

efektívne zrážky, potenciálne evapotranspirácia , reálna evapotranspirácia , geoštatistika, Slovensko

ÚVOD

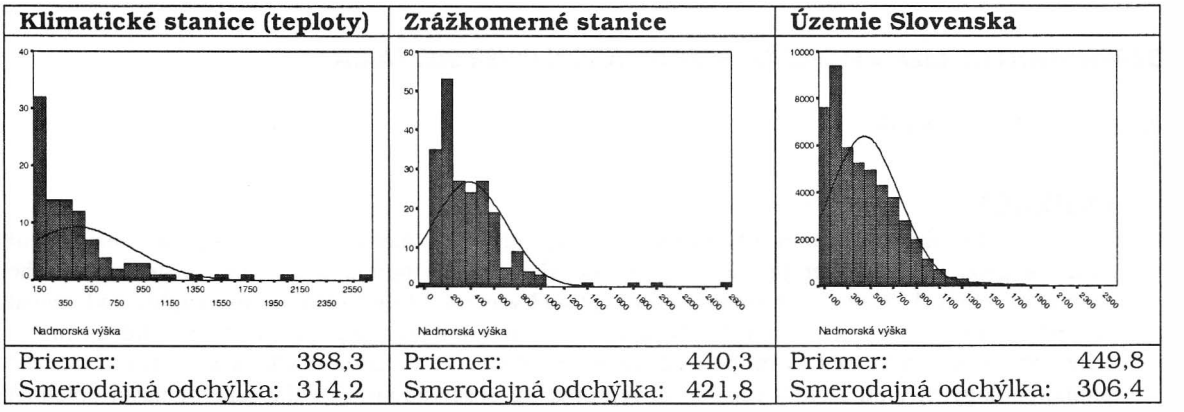
Efektívne zrážky, t.j. tá časť zrážkových úhrnov, ktorá je schopná infiltrovať do horninového prostredia, hrajú popri hydrogeologických pomeroch a hydraulických parametroch kolektorských hornín kľúčovú úlohu pri hodnotení doplňovania podzemných vôd. Ich veľkosť ja daná rozdielom zrážkových úhrnov a reálnej evapotranspirácie v území.

Priemerné mesačné teploty vzduchu a priemerné mesačné zrážkové úhrny sú dva kľúčové parametre vstupujúce do výpočtu reálnej evapotranspirácie. Je však všeobecne známe, že teplota vzduchu ako aj zrážkové úhrny sú značne komplexnou kombináciou termodynamických, dynamických a mikrofyzikálnych atmosférických procesov, ovplyvnených komplikovanou interakciou s reliéfom, ktoré sú premenlivé v rámci širokého rozsahu priestorových a časových mierok. Fundamentálnym problémom hydrológie preto je odhad teploty a zrážok na nemonitorovaných miestach použijúc údaje z okolitých meteorologických staníc. Získanie hodnoverných údajov je obzvlášť náročné v miestach s riedkou monitorovacou sieťou alebo v oblastiach kde teplotné a zrážkové charakteristiky sa výrazne menia s meniacou sa polohou. Táto situácia často nastáva najmä v hornatých oblastiach, kde je nedostatok meteorologických staníc situovaných vo vyšších nadmorských výškach a kde orografické efekty môžu byť veľmi významné. Porovnaním distribúcie nadmorských výšok meteorologických staníc a celého územia Slovenska (obr. 1) sa meteorologická sieť môže javiť navrhnutá vhodne, no keďže prevažná väčšina staníc sa nachádza v miestach do 800 m n.m., odhad klimatických činiteľov v hornatých oblastiach je takto veľmi sťažený.

Problematikou regionalizácie klimatických charakteristík v priestore sa vo svete zaoberalo už mnoho autorov, ich prístupy siahajú od jednoduchých algoritmov až po vysoko sofistikované procedúry. Celý rad prehľadov, kompilácií a dokonca porovnávacích analýz je dostupný v prácach: Creutin J.D & Obled, 1982, Tabios & Salas (1985), Heresi et al. (1992a),

Mgr. Jaromír Švasta, RNDr. Peter Malík, CSc.
Štátny geologický ústav Dionýza Štúra, Mlynská dolina 1, 817 04 Bratislava 11, svasta@geology.sk, malik@geology.sk

Daly et al. (1994), Willmott & Matsuura (1995), Kravchenko (1996), Thornton (1997), Bolstad (1998), van Dieppen & Van der Voet (1998), Tveito et al., (2000), Hofierka et al., (2002), Auer et al., (2005), Adam et al., (2006).



Obr. 1: Histogramy rozdelenia nadmorských výšok klimatických a zrážkomerných staníc v porovnaní s rozdelením nadmorských výšok celého územia Slovenska

Fig. 1: Altitudinal distribution of climate stations (air temperature measurements) and precipitation stations compared to that of the whole surface of Slovakia

Všeobecne možno prístupy k regionalizácii klimatických charakteristík v priestore rozdeliť na dve základné skupiny: deterministické a stochastické. Deterministické metódy používajú na vysvetlenie priestorových fenoménov fyzikálne modely, zatiaľ čo stochastické metódy používajú teóriu pravdepodobnosti a do priestorových vzťahov zakomponovávajú náhodné javy. Tradičným spôsobom interpolácie teploty a zrážok, kedy sa hodnota v medziľahlom priestore odhadovala na základe údajov z niekoľkých najbližších staníc, je prakticky nemožné vystihnúť ich lokálnu variabilitu. V našej práci sme prijali predpoklad, že teploty i zrážky možno opísať ako spolupôsobenie deterministických i stochastických procesov. Deterministický komponent vyjadruje procesy, ktoré platia všeobecne pre celé územie, zatiaľ čo miestna variabilita je zistená geoštatisticky z rezíduí získaných po odstránení globálneho trendu.

VSTUPNÉ DÁTA A ICH KVALITA

Základnými vstupnými údajmi do analýzy boli priemerné mesačné teploty vzduchu z 98 klimatických staníc a mesačné zrážkové úhrny z 211 zrážkomerných staníc pre obdobie rokov 1951-1980, publikované v zborníku Slovenského hydrometeorologického ústavu (Kolektív autorov, 1991). Údaje z ostatných staníc sme bohužiaľ nemali k dispozícii. Polohy klimatických a zrážkomerných staníc boli získané z internetovej stránky SHMÚ (http://www.shmu.sk/). V analýze bolo použitých aj viacero parametrov odzrkadľujúcich morfológiu terénu, pre tento účel bol použitý digitálny model reliéfu (DMR) SRTM (USGS (2002)) s rozlíšením 3 uhlové sekundy. Hodnoty poľnej vodnej kapacity, potrebné pre výpočet reálnej evapotranspirácie, boli odvodené konfrontáciou DMR a digitálnych podkladov VÚPOP pre Národnú správu o implementácii rámcovej smernice o vodách v oblasti podzemných vôd (Kullman et al. 2005).

PRIESTOROVÁ ANALÝZA, METÓDY A VÝSLEDKY

Výpočet reálnej evapotranspirácie pre celé územie Slovenska prebiehal v štyroch krokoch:

1. interpolácia priemerných mesačných teplôt vzduchu,
2. interpolácia mesačných zrážkových úhrnov,
3. výpočet potenciálnej evapotranspirácie v mesačných krokoch podľa Thornthwaita,
4. výpočet reálnej evapotranspirácie v mesačných krokoch,
5. výpočet efektívnych zrážok.

Teploty a zrážky namerané na klimatických staniciach sú výsledkom pôsobenia fyzikálnych procesov v atmosfére ovplyvnených lokálnymi javmi. Preto sme sa rozhodli v analýze použiť metódu reziduálneho krigovania, taktiež nazývaného detrendované krigovanie, ktorá je veľmi vhodná práve na analýzy distribúcie environmentálnych premenných - Creutin J.D & Obled (1982), Tabios & Salas (1985), Hevesi et al. (1992a), Kravchenko (1996), Thornton (1997), Bolstad (1998), Sitková (2000), Gonzalez-Hidalgo (2001), Tveito (2002), Li (2003), Auer et al. (2005), Ustrnul & Czekierda (2005).

Krigovanie je geoštatistická interpolačná metóda, ktorá optimalizuje interpoláciu klasifikovaním priestorovej variancie do troch komponentov (Burroughs & McDonnel (1998)): a) deterministickej

variancie (rozličné hladiny alebo trendy), ktorá je použitá ako vedľajšia, „mäkká" informácia, b) priestorovo korelovanej, avšak ťažko opísateľnej variancie a nakoniec c) nekorelovateľneho šumu. Modelovanie variogramu je nevyhnutnou a podstatnou súčasťou krigovania. Model variogramu zviditeľňuje priestorovú koreláciu v dátach a slúži ako podklad pre priradenie váh a vyhľadávacieho polomeru pre samotné krigovanie.

Hlavnou výhodou krigovania oproti jednoduchším deterministickým metódam je to, že umožňuje presnejší odhad teplôt a zrážok na nemonitorovaných územiach použitím informácií z okolitých staníc takým spôsobom, že využíva aj priestorovú korelačnú štruktúru teplotných a zrážkových polí. Ďalšou silnou stránkou krigovania je minimalizácia odhadovanej variancie, čo spätne umožňuje analýzu interpolačnej chyby.

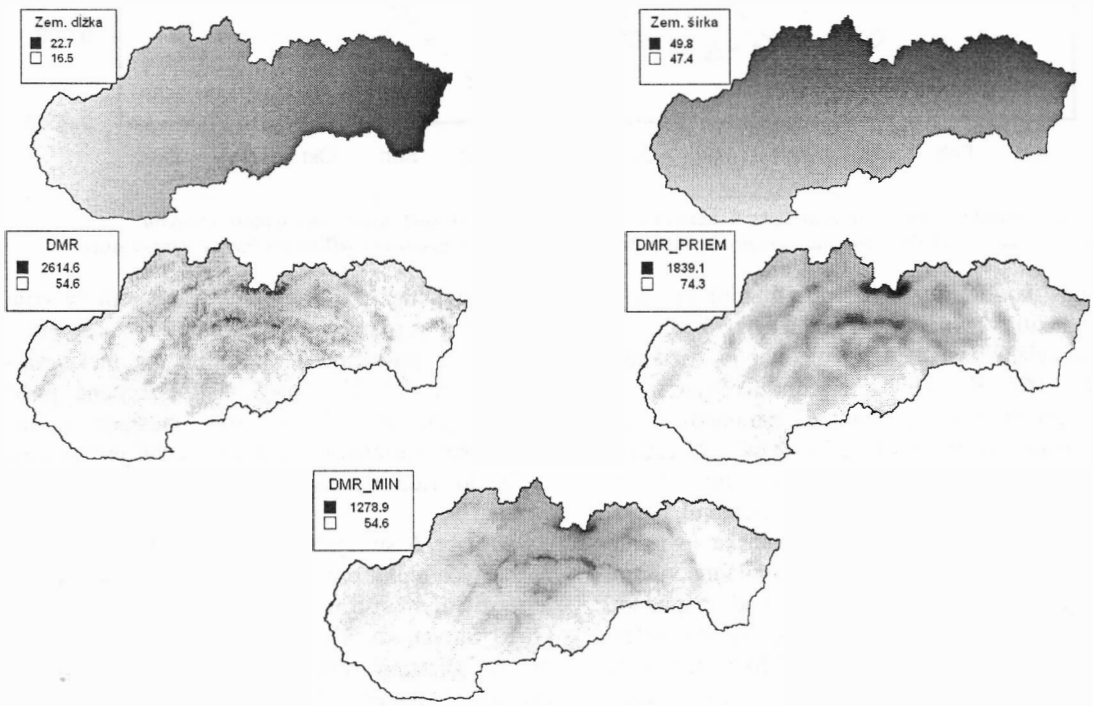
V tejto práci sme na definovanie trendu v teplotných a zrážkových dátach zvolili lineárnu regresiu. Keďže sme študovali vplyv viacerých premenných, použili sme krokovú regresiu (Tveito et al., 2000).

INTERPOLÁCIA PRIEMERNÝCH MESAČNÝCH TEPLÔT VZDUCHU

Na území Slovenska možno v teplotách vzduchu sledovať viacero závislostí. Najvýraznejšia je závislosť od nadmorskej výšky stanice, ktorá býva vyjadrená vertikálnym teplotným gradientom v jednotkách °C.m-1. Vertikálny teplotný gradient sa mení nielen v čase ale aj lokálne, jeho hodnoty kolíšu v širokom rozmedzí od hodnôt pod globálnym gradientom -0,0065 °C.m-1 až po kladné hodnoty v čase teplotných inverzií. Nadmorská výška stanice však nevystihuje úplne variácie v priemerných mesačných teplotách, tieto do značnej miery závisia aj od lokálnych geomorfologických podmienok (Tveito et al., 2000). Preto boli okrem nadmorskej výšky do krokovej regresie zahrnuté ďalšie dve topografické premenné, a to priemerná nadmorská výška v okruhu 5 km a minimálna nadmorská výška v tom istom okruhu, ktoré obe slúžia ako nepriame indikátory vplyvu terénu v mezoškále. Idea vychádzala z toho, že stanice vo väčších nadmorských výškach (napr. na vrcholoch kopcov) odrážajú v porovnaní s okolím iné vplyvy než stanice v menších výškach (napr. v dolinách).

Atlantický oceán funguje ako akumulátor tepla, čo ovplyvňuje teplotné pomery v celej Európe. Úplne protichodný teplotný režim majú rozsiahle vnútroruské roviny s extrémnymi sezónnymi výkyvmi teplôt. Oba tieto vplyvy sa na našom území stretávajú, priebeh najvýraznejšej zmeny je približne v smere východ-západ. Na vyjadrenie kontinentality bola preto do krokovej lineárnej regresie ako ďalšia premenná vybratá zemepisná dĺžka.

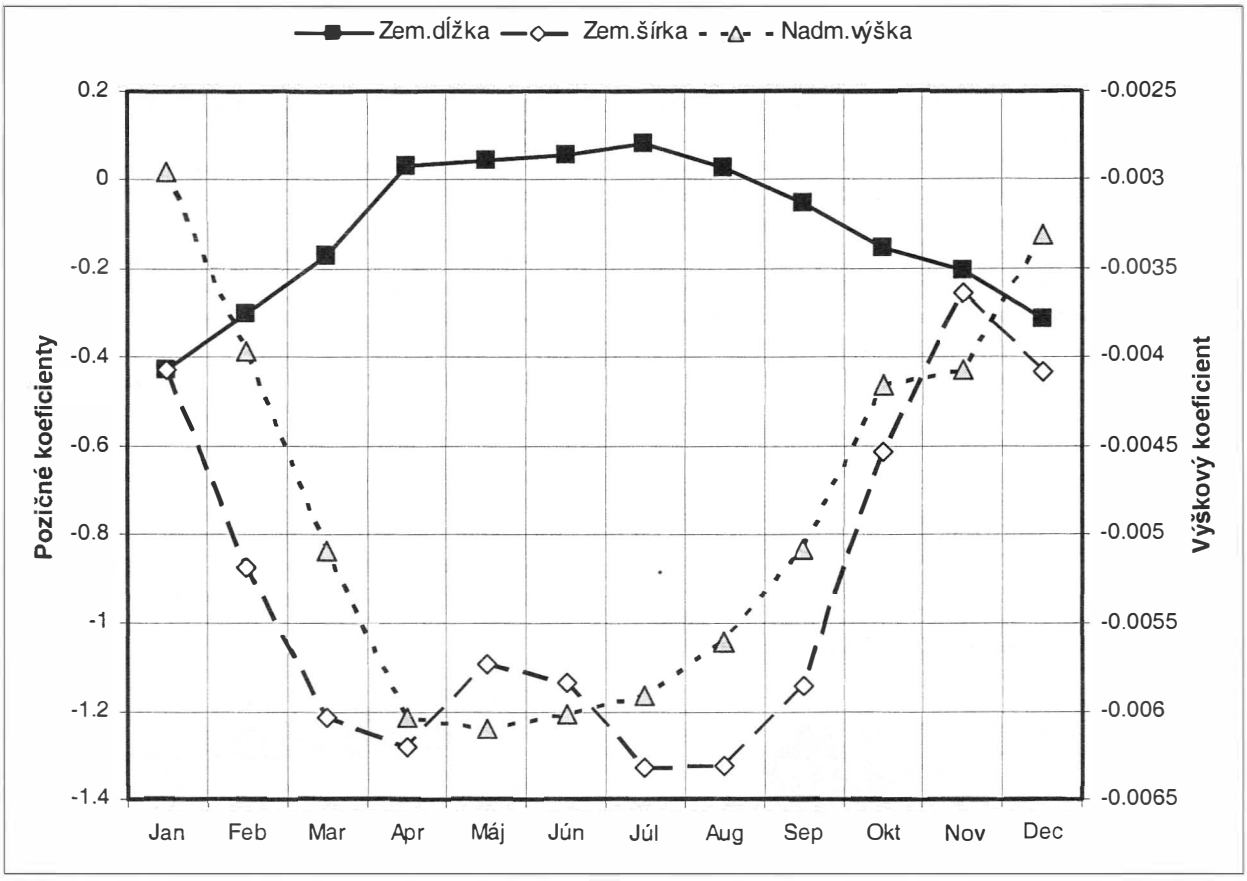
Ostatnou premennou vstupujúcou do krokovej regresie je zemepisná šírka, ktorá vyjadruje severo-južný gradient teplôt, čiže slnečné žiarenie.



Obr. 2: Rastrové mapy piatich parametrov použitých v krokovej regresii na zistenie trendu v priemerných mesačných teplotách i mesačných zrážkach

Fig. 2: Raster maps of the five parameters used in the stepwise regression employed to reveal trends in mean monthly air temperatures and mean monthly precipitation

Počas samotnej krokovej regresie sa však nepreukázala významnejšia korelácia s DMR_MIN a DMR_MEAN, tieto dva parametre neboli do analýzy zahrnuté. Výsledné regresné koeficienty pre jednotlivé parametre sú na obr. 3. Z grafu je evidentný rozdiel v závislosti teploty vzduchu od všetkých troch parametrov počas letných a zimných mesiacov. Zjavný je vplyv kontinentality vyjadrený parametrom zemepisnej dĺžky, ktorý má v zime záporné a v lete kladné hodnoty. V jarných až letných mesiacoch sa vertikálny teplotný gradient blíži globálnemu gradientu -0,0065 °C.m^{-1}, v zime naopak smeruje k hodnotám blízkym hodnote suchého adiabatického gradientu -0,001 °C.m^{-1}, čo je pravdepodobne spôsobené častým výskytom inverzií.

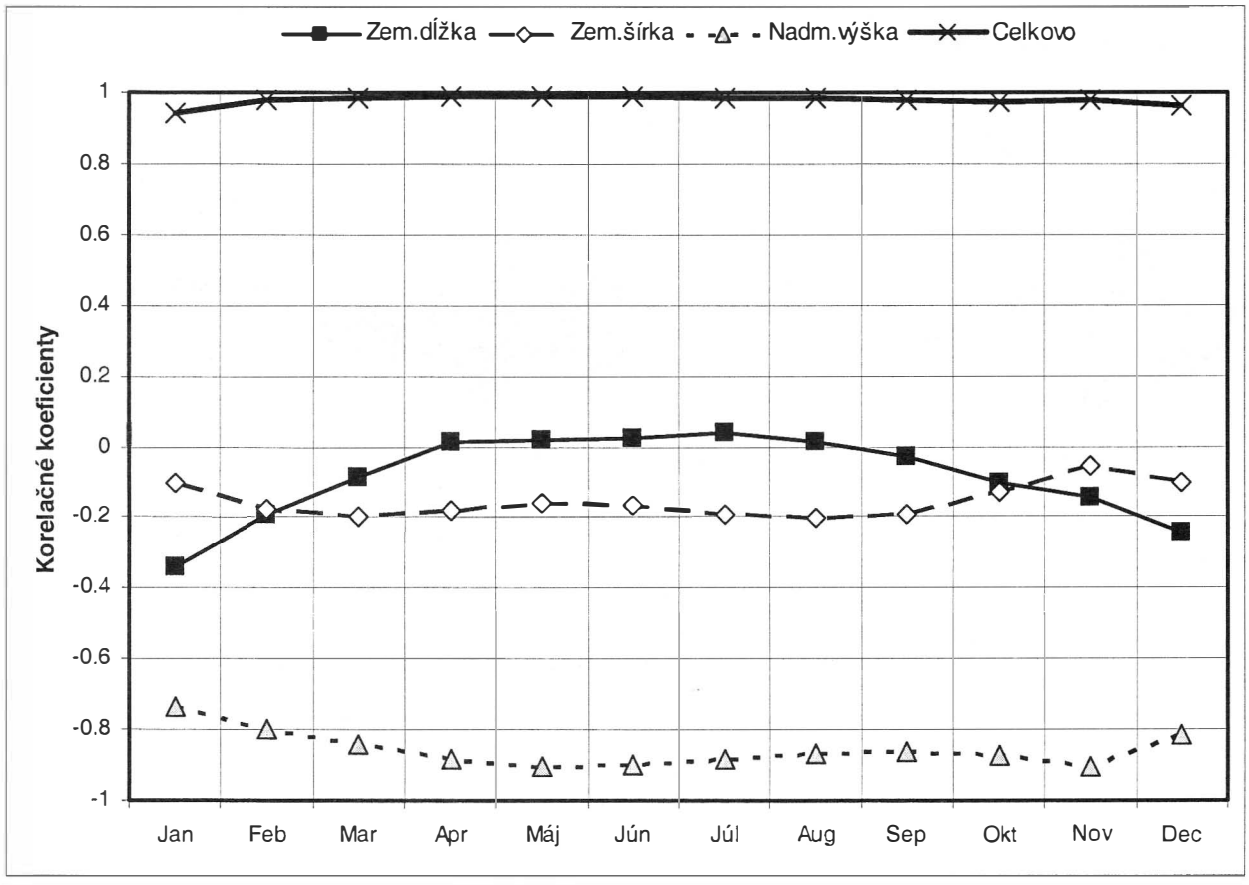


Obr. 3: Mesačná variabilita pozičných (zem. šírka a dĺžka) a výškových regresných koeficientov pre teploty vzduchu
Fig. 3: Monthly variability of the positional (longitude, latitude) and altitudinal regression coefficients for air temperatures

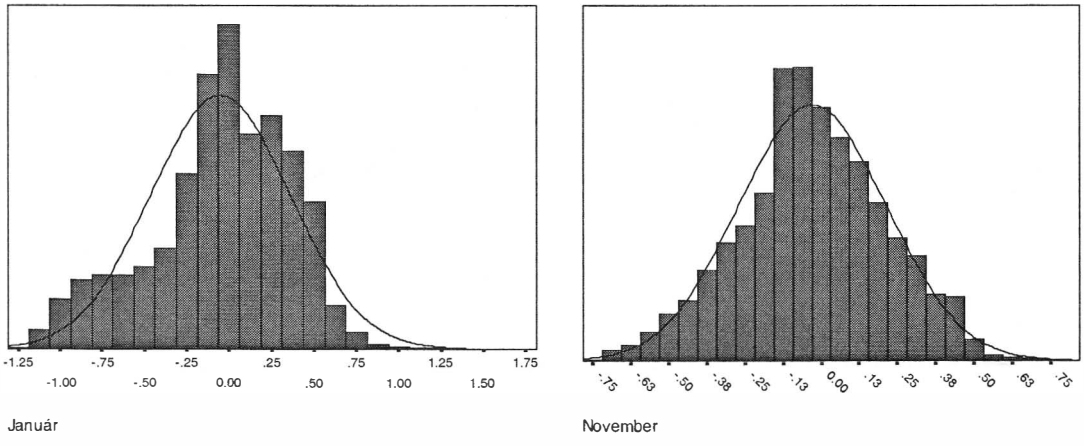
Korelačné koeficienty na obr. 4 dokumentujú vhodnosť použitia zvolených parametrov, koeficient determinácie celého štatistického modelu je v rozsahu od 0,892 do 0,977. Korelácie pre jednotlivé parametre nie sú v priebehu roka konštantné, parametre majú v priebehu roka premenlivú dôležitosť. Korelácie zemepisnej šírky sú najslabšie počas zimy. To je pravdepodobne spôsobené veľkými gradientami medzi východnou a západnou časťou Slovenska v tomto období, spôsobených dlhotrvajúcimi tlakovými výšami nad Ruskom hraničiacimi s nížami nad západnou Európou. V tomto období dochádza k výskytu veľmi nízkych teplôt vo východnej časti, zatiaľ čo na západe je variabilita teplôt nižšia kvôli akumulácii tepla v oceáne.

Rezíduá získané po odstránení trendu boli pre každý mesiac a taktiež pre priemerné ročné teploty krigované do rastra s rozmermi bunky 1000 x 1000 m. Táto veľkosť je postačujúca vzhľadom na nízku varianciu výsledných dát. Na obr. 5 sú znázornené početnosti krigovaných rezíduí pre dva mesiace s najvyššou a najnižšou varianciou. Rozsah rezíduí je v priemere od -1,38 do 1,03 °C, čo svedčí o dobre identifikovanom trende.

Na obr. 6 sú výsledné rastrové mapy priemerných mesačných teplôt pre mesiac január a august, na ktorých je možné demonštrovať výrazný vplyv kontinentality na klímu Slovenska. V zime sú východné časti Slovenska oproti miestam s rovnakou zemepisnou šírkou na západe o takmer 1,5 °C chladnejšie, v lete naopak takmer o 0,5 °C teplejšie.



Obr. 4: Mesačná variabilita pozičných a výškových korelačných koeficientov pre teploty vzduchu
Fig. 4: Monthly variability of the positional and altitudinal correlation coefficients for air temperatures

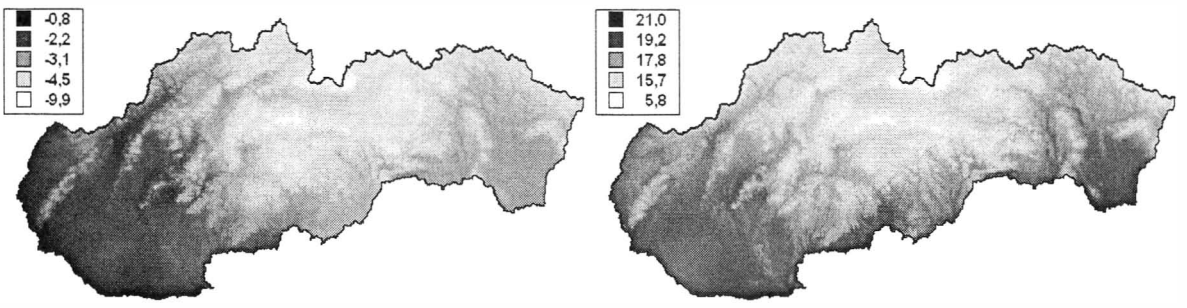


Obr. 5: Histogramy krigovaných rezíduí teplôt vzduchu pre január a november
Fig. 5: Histograms of krigged air temperature residuals for January and November

INTERPOLÁCIA PRIEMERNÝCH MESAČNÝCH ZRÁŽKOVÝCH ÚHRNOV

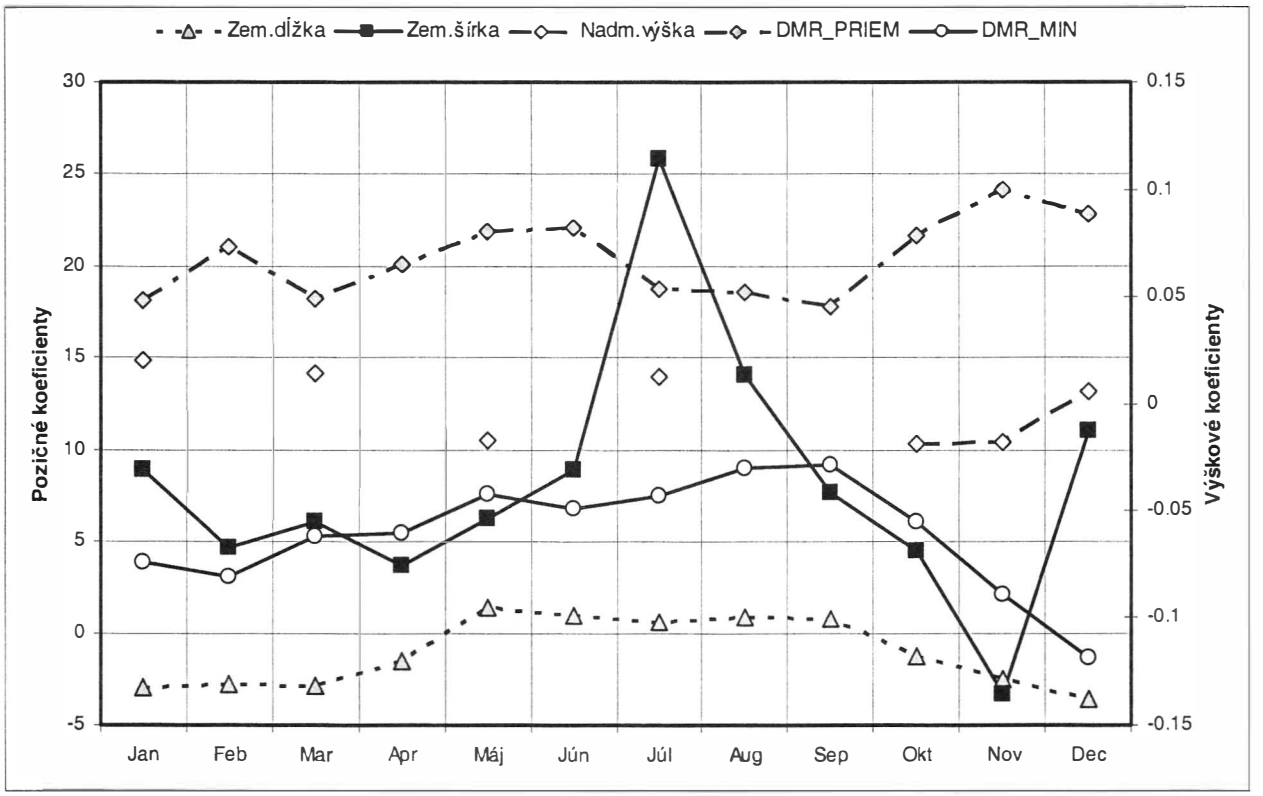
Pri zrážkových úhrnoch sme postupovali identicky ako pri teplotách, t.j. použité bolo opäť reziduálne krigovanie, pričom globálny trend bol identifikovaný krokovou lineárnou regresiou tých istých piatich parametrov: zemepisnej šírky a dĺžky, nadmorskej výšky staníc, DMR_PRIEM a DMR_MIN (obr. 2). Priestorová variabilita zrážok je značne vyššia ako u teplôt, pretože je lokálne ovplyvnená okrem iného aj prevládajúcim typom cirkulácie vzdušných más. Situáciu navyše komplikujú ťažkosti pri presnom

meraní zrážkových úhrnov najmä na vysoko situovaných staniciach na vrcholkoch hrebeňov a hôr, kde je problém zachytiť zrážku pri častých silných vetroch. Tieto okolnosti sa odrazili na menšej parciálnej i celkovej korelácii (obr. 8) pri krokovej regresii piatich parametrov.



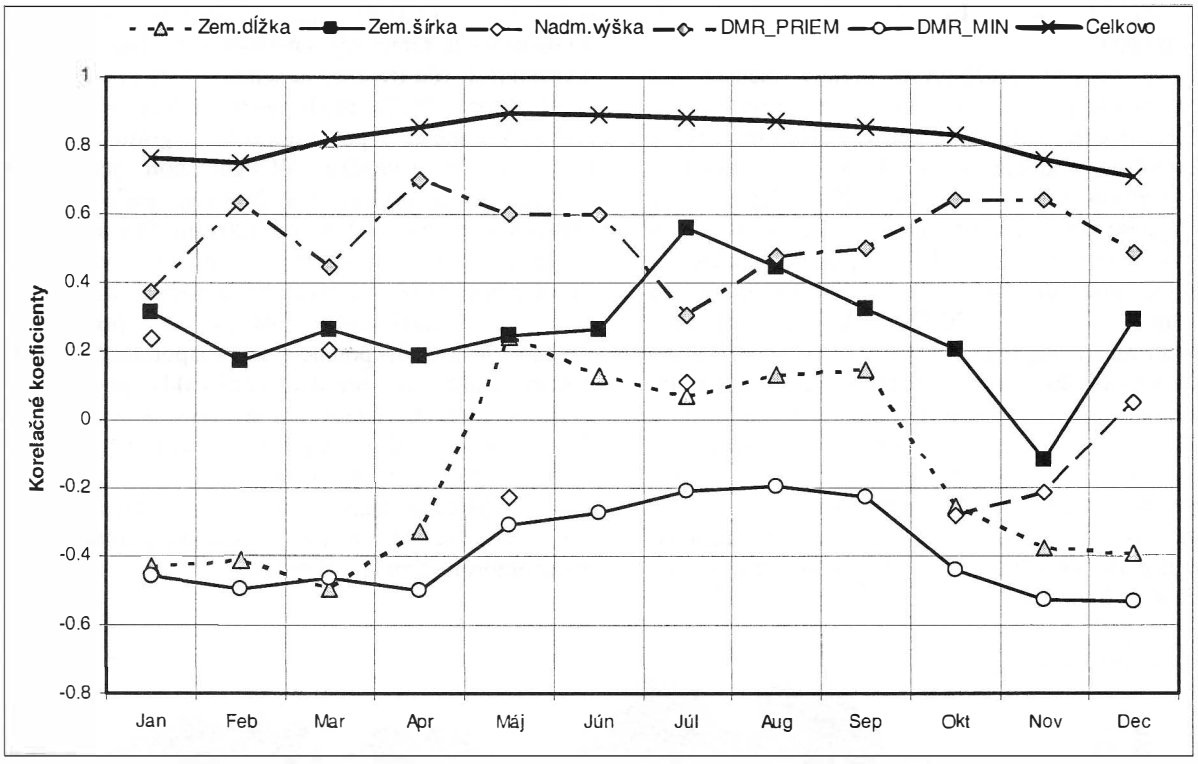
Obr. 6: Interpolované priemerné teploty vzduchu, príklady pre mesiac január (vľavo) a august
Fig. 6: Interpolated mean monthly air temperatures, examples for January (left) and August

Podobne ako pri zrážkach môžeme sledovať meniacu sa závislosť zrážok od zemepisnej dĺžky, kde v zime pozorujeme zvyšovanie zrážkových úhrnov smerom na východ, v lete je tento trend mierne opačný (obr. 7).



Obr. 7: Mesačná variabilita pozičných a výškových regresných koeficientov pre zrážkové úhrny
Fig. 7: Monthly variability of the positional and altitudinal regression coefficients for precipitation totals

Na overenie výsledkov a zistenie chyby odhadovaných hodnôt bola vykonaná krížová analýza, pri ktorej sa z celého súboru vyberie jedno pozorovanie pre ktoré sa porovná nameraná hodnota s odhadovanou a proces sa opakuje pre všetky pozorovania.



Obr. 8: Mesačná variabilita pozičných a výškových korelačných koeficientov pre zrážkové úhrny
Fig. 8: Monthly variability of the positional and altitudinal regression coefficients for precipitation totals

VÝPOČET POTENCIÁLNEJ EVAPOTRANSPIRÁCIE

Pre určenie priemernej potenciálnej evapotranspirácie E_P bol vybraný výpočet podľa Thornthwaita (1948, 1955), s mesačným krokom hodnotenia. Táto metóda výpočtu mesačnej potenciálnej evapotranspirácie vychádza z ľahko získateľných podkladových údajov: z priemernej teploty vzduchu (meranej v tieni) a z teoretickej dĺžky slnečného žiarenia (astronomický údaj v závislosti na období a na zemepisnej šírke hodnotenej oblasti). Priemerná mesačná teplota vzduchu vstupuje do výpočtu explicitne, jej prostredníctvom sa stanovujú hodnoty mesačných termických indexov a z nich sa sumáciou stanovuje komplexná funkcia ročného termického indexu. Hodnota korekčného koeficientu závisí od zemepisnej šírky a jeho hodnoty pre jednotlivé mesiace sú spracované tabelárne (Kullman et al., 2002). Priradenie teoretickej dĺžky slnečného žiarenia a priemernej teploty vzduchu a následný výpočet potenciálnej evapotranspirácie E_P boli realizované pre každý objekt rastra s rozmermi bunky 1000 x 1000 m, pre ktorý boli v predchádzajúcich výpočtoch krigované priemerné mesačné teploty obdobia rokov 1951 – 1980.

VÝPOČET REÁLNEJ EVAPOTRANSPIRÁCIE

Hodnotenie reálnej evapotranspirácie E_R môže vychádzať z akejkoľvek výpočtovej metódy podávajúcej správne výsledky o mesačnej potenciálnej evapotranspirácii (E_P). Pre určenie priemernej reálnej evapotranspirácie sme si vybrali výpočet potenciálnej evapotranspirácie podľa Thornthwaita (1948, 1955), s mesačným krokom hodnotenia. Táto metóda sa podľa Kullmana et al. (1997) resp. Kullmana (2000) v porovnaní s refe-renčnými hodnotami javí ako najpresnejšia. Pri výpočte reálnej mesačnej evapotranspirácie z potenciálnej mesačnej evapotranspirácie skúmame 3 možné vzťahy medzi mesačnými zrážkovými úhrnmi **Z** a potenciálnou mesačnou evapotranspiráciou E_P, z ktorých sa odvíja riešenie veľkosti E_R.

a) $E_P < Z \Rightarrow E_R = E_P$

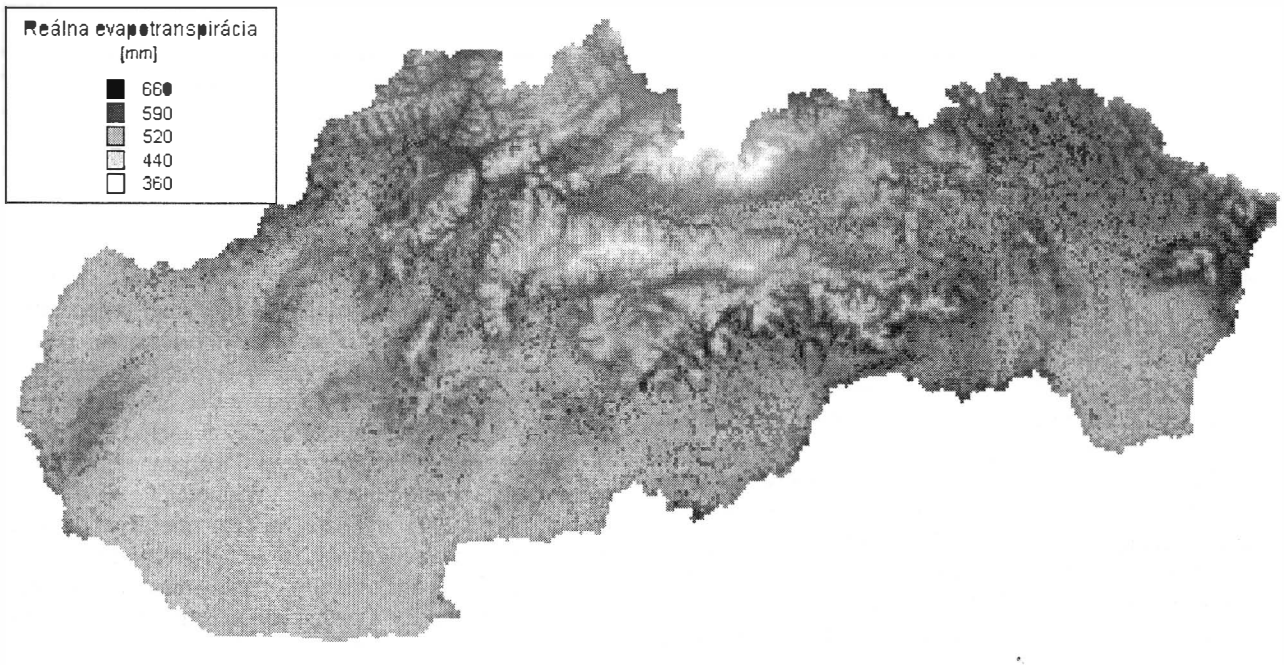
V tomto prípade rozdiel medzi **Z** a E_P zvyšuje zásoby pôdnej vody až do úplného nasýtenia pôdy a zvyšok je k dispozícii pre povrchový odtok a pre infiltráciu.

b) $E_P = Z \Rightarrow E_R = E_P = Z$

V prípade b) sa zásoby pôdnej vody nemenia a úhrn zrážok sa spotrebuje v plnom rozsahu na pokrytie reálnej evapotranspirácie

c) $E_P > Z$ => $E_R = Z$ + časť alebo celé zásoby pôdnej vody

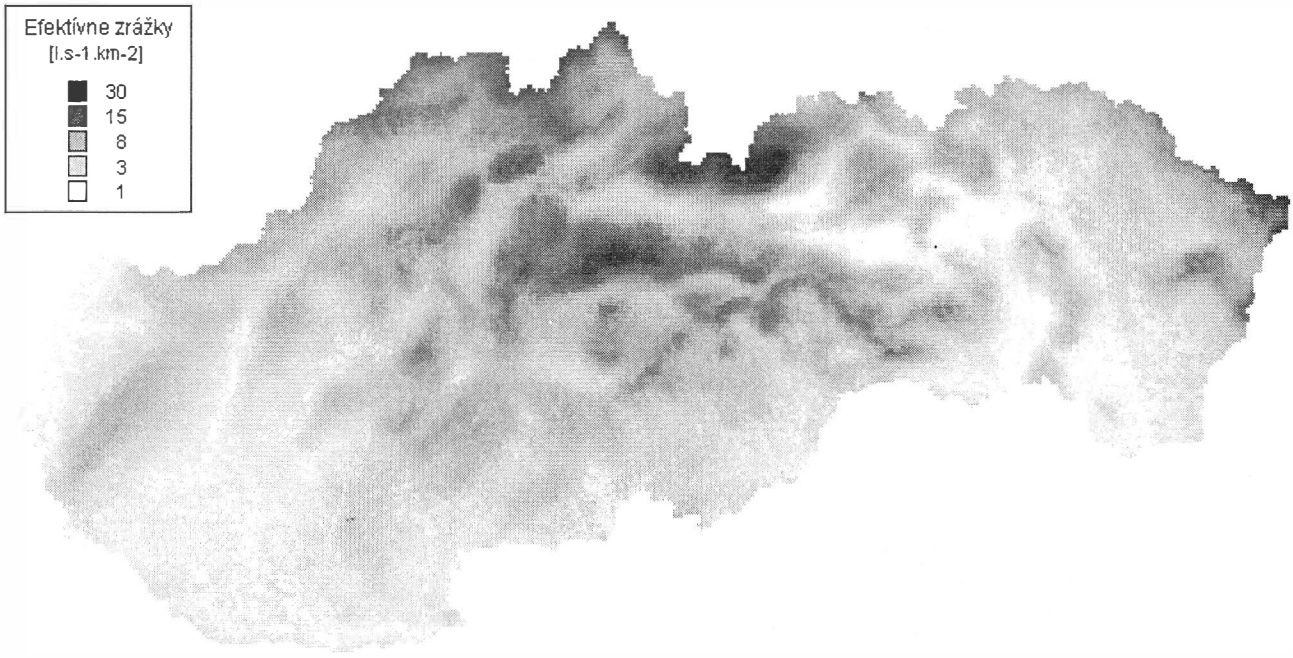
Ak je veľkosť zrážkových úhrnov menšia než hodnota potenciálnej evapotranspirácie (prípad c), na pokrytie evapotranspirácie sa využíva celý úhrn zrážok za hodnotené obdobie a dochádza k zmenšovaniu (úbytku) zásob pôdnej vody ($E_P = Z + \Delta Rp$). Ak na krytie výparu nepostačuje súčet zrážok a zásob pôdnej vody (ak zásoby pôdnej vody sú úplne vyprázdnené), potom je hodnota $E_P - E_R$ deficitom doplňania (Kullman et al., 2002). Výpočet reálnej evapotranspirácie E_R bol takisto ako v predchádzajúcom prípade výpočtu E_P realizovaný pre každý objekt rastra s rozmermi bunky 1000 x 1000 m, pre ktorý boli vypočítané priemerné hodnoty potenciálnej evapotranspirácie v období rokov 1951 – 1980 a stanovené hodnoty mesačných zrážkových úhrnov pre to isté obdobie. Hodnoty poľnej vodnej kapacity, vstupujúce do výpočtu reálnej evapotranspirácie, boli odvodené konfrontáciou DMR s pedologickými podkladmi VÚPOP pre Národnú správu o implementácii rámcovej smernice o vodách v oblasti podzemných vôd (retenčnou schopnosťou pôd; Kullman et al. 2005). Podľa príslušnosti mediánovej hodnoty reklasifikovaného pedologického gridu k jednej z možných 5 kategórií VÚPOP boli jednotlivým bunkám gridu priraďované hodnoty poľnej vodnej kapacity v intervale od 80 do 120 mm. Pre prekonanie počiatočnej nerovnováhy medzi vstupmi a výstupmi vo výpočte bol pri použití tých istých hodnôt priemerných mesačných zrážkových úhrnov a priemerných mesačných hodnôt potenciálnej evapotranspirácie E_P výpočet realizovaný pre dva ročné cykly, pričom sa za výsledné brali do úvahy iba hodnoty vypočítané pre druhý ročný cyklus. Výsledky tohto výpočtu pre celkove 50179 buniek rastra 1000 x 1000 m sú na obr. 9. Výsledná mapa reálnej evapotranspirácie na obr. 9 je v súlade s bodovými údajmi publikovanými inými autormi (Tomlain, 1997).



Obr. 9: Rastrová mapa priemernej ročnej reálnej evapotranspirácie v rokoch 1951-1980 pre územie Slovenska.
Fig. 9: Raster map of mean annual real (actual) evapotranspiration over Slovakia during the period 1951-1980.

EFEKTÍVNE ZRÁŽKY

Hodnota efektívnych zrážok, t.j. tej časti zrážkových úhrnov, ktorá je schopná tvoriť odtok povrchových vôd alebo infiltrovať do horninového prostredia bola napokon stanovená jednoducho ako rozdiel zrážkových úhrnov a reálnej evapotranspirácie v území (obr. 10). Výsledná rastrová mapa zobrazujúca hodnoty priemerných efektívnych zrážok v jednotkách [$l.s^{-1}.km^{-2}$] poskytuje realistické hodnoty efektívnych zrážok na Slovensku pre obdobie rokov 1951 - 1980. Na obr. 11 sú tie isté hodnoty priemerných efektívnych zrážok (1951-1980) znázornené v rozmere [mm]. Nami vypočítaná priemerná hodnota efektívnych zrážok pre územie Slovenska má pre obdobie rokov 1951-1980 veľkosť 176,5 mm (5,60 $l.s^{-1}.km^{-2}$), pri priemerných zrážkach 721,9 mm a priemernej reálnej evapotranspirácii 545,5 mm (priemerný ročný poten-ciálny výpar metódou Thornthwaita je 638,3 mm). Priemerný ročný objem zrážok spadnutých na územie Slovenska by bol potom 35,395 km^3, a podiel nevy-parenej vody cca 24,4 % (8,653 km^3).



Obr. 10: Rastrová mapa priemerných ročných efektívnych zrážok v rokoch 1951-1980 na území Slovenska, uvádzaných v jednotkách [$l.s^{-1}.km^{-2}$].

Fig. 10: Raster map of mean annual effective precipitation (in $l.s^{-1}.km^{-2}$) over Slovakia during the period 1951-1980.

DISKUSIA

Výsledky vypočítaných hodnôt potenciálnej a reálnej evapotranspirácie E_P a E_R boli konfrontované s hodnotami pre obdobie rokov 1951-1980 publikovanými v zborníku Slovenského hydrometeorologického ústavu (Kolektív autorov, 1991) pre 49 staníc. Od hodnôt E_P a E_R vypočítaných pre príslušné bunky gridu, v ktorých sa tieto stanice nachádzajú, boli odčítané „zborníkové" hodnoty E_P a E_R. V prípade dát publikovaných v zborníku SHMÚ vykonal výpočet E_P a E_R J. Tomlain metódou, ktorú navrhli Budyko (1974) a Zubenoková (1976; Tomlain in Kolektív autorov, 1991).

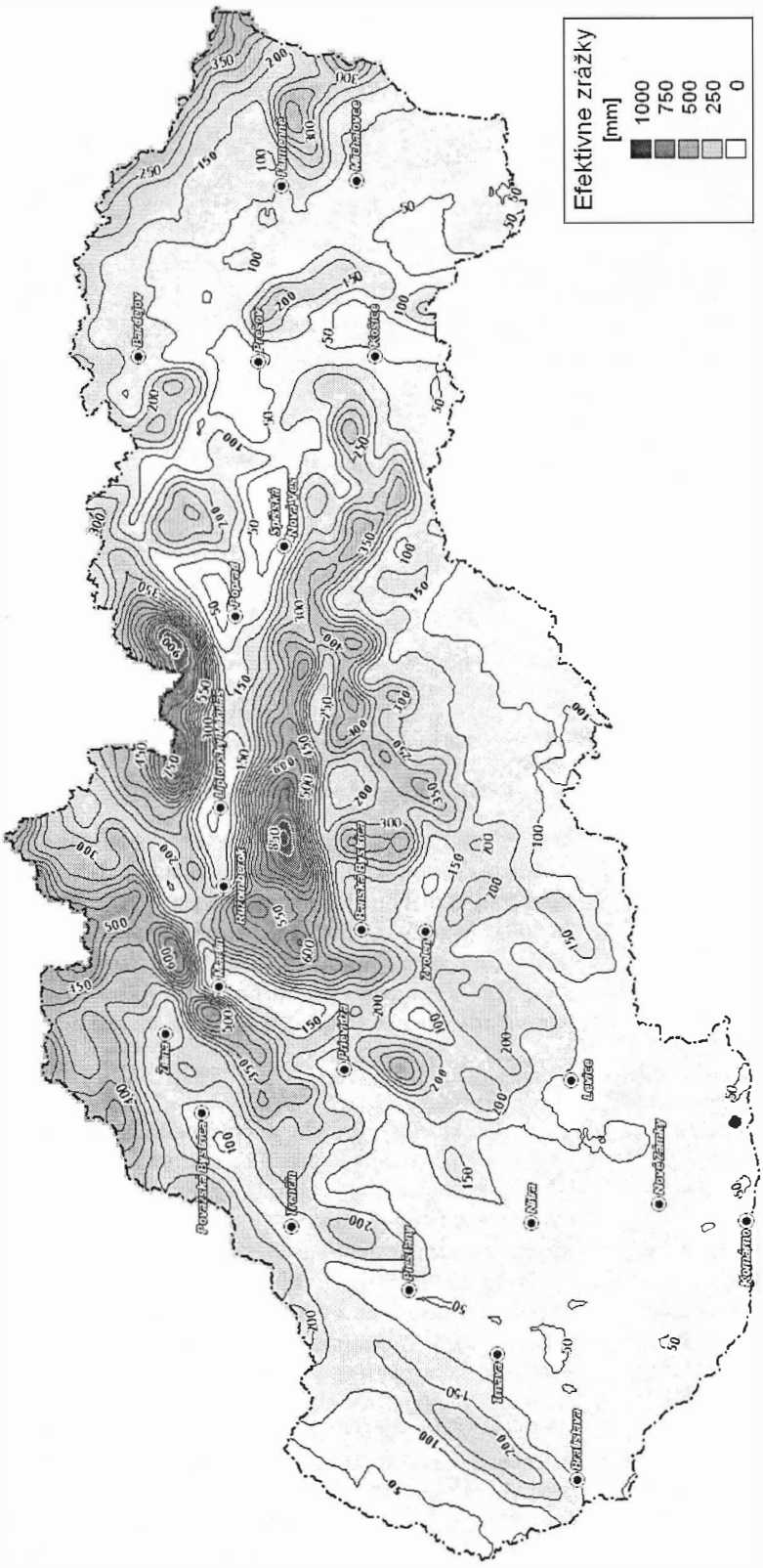
Priemerný rozdiel hodnôt potenciálnej evapotranspirácie E_P má veľkosť +54 mm (t. j. nami vypočítané hodnoty E_P boli priemerne o 54 mm vyššie), s relatívnou chybou 9,2 %. Ukazuje sa, že v prípade potenciálnej evapotranspirácie je výrazný trend zvyšovania veľkosti odchýlok so zemepisnou šírkou, ako aj s nadmorskou výškou, čo signalizuje rozdielne zohľadňovanie parametra teploty vo výpočte. V prípade vyšších hodnôt potenciálnej evapotranspirácie E_P (okolo 700 mm) sa však výsledky oboch výpočtov začínajú zhodovať.

V prípade rozdielu vypočítaných a publikovaných hodnôt reálnej evapotranspirácie E_R má tento priemernú veľkosť len +16 mm, s relatívnou chybou 3,5 %. Nami vypočítané hodnoty E_R boli teda priemerne o 16 mm vyššie. Veľkosť rozdielov však nekoreluje ani s nadmorskou výškou, ani s polohou staníc definovanou zemepisnou dĺžkou alebo zemepisnou šírkou. Je zjavné, že obe metódy vychádzajú z rozdielnych vstupných údajov, avšak nami použitá metóda má menšie nároky na počet a objemy meraných, resp. odvodzovaných parametrov (merné vlhkosti vzduchu, radiačná bilancia).

ZÁVER

Praktické dôsledky stanovenia priemerných hodnôt efektívnych zrážok pre jednotlivé regióny sú z hydrogeologického hľadiska zaujímavé nielen v spojení s tvorbou množstiev podzemnej vody, ale aj pri riešeniach kvalitatívnych problémov. Do popredia vtedy vystupuje klimatický dekontaminačný potenciál územia – znižovanie koncentrácie znečisťujúcich látok jednoduchým riedením. Ako príklad môžme uviesť rozdielne koncentrácie dusičnanov v poľnohospodársky analogicky využívaných územiach (Kordík, 2003, Vrana a Malík, 2003), keď v oblasti okresu Martin je priemerná hodnota koncentrácií NO_3^- 14,6 $mg.l^{-1}$ (248 vzoriek) a v okrese Poltár 31,5 $mg.l^{-1}$ (177 vzoriek). Podobne je to aj pri porovnaní okresu Liptovský Mikuláš, kde dosahujú koncentrácie NO_3^- priemernú hodnotu 7,2 $mg.l^{-1}$ (432 vzoriek) s okresom Revúca s priemerom 20,6 $mg.l^{-1}$ (244 vzoriek).

Každé riešenie kvantitatívnych hydrogeologických vzťahov numerickým modelovaním si takisto vyžaduje



Obr. 11: Mapa priemerných efektívnych zrážok v rokoch 1951-1980 na území Slovenska, uvádzaných v jednotkách [mm]. Základný interval izočiar je 50 mm.

Fig. 11: Map of mean effective precipitation (in mm) over Slovakia during the period 1951-1980. Contours base interval is 50 mm.

ako jednu zo základných vstupných hodnôt veľkosť efektívnych zrážok (ktoré si však, žiaľ, mnohí dodnes zamieňajú s veľkosťou zrážkových úhrnov, čím vzniklo už veľa omylov a nepresností). Pri zbežnom pohľade na obr. č. 10 alebo 11 prichádzame k poznaniu, že väčšina vodného bohatstva Slovenska sa vytvára v oblasti Vysokých Tatier (vrátane Západných a Belianskych Tatier), Malej a Veľkej Fatry a západnej časti Nízkych Tatier a Slovenských Beskýd. Prekvapuje i vysoká úroveň efektívnych zrážok v oblasti Bukovských vrchov. Pri porovnaní niektorých regiónov zisťujeme, že kým v oblasti Krivánskej Malej Fatry sa hodnoty efektívnych zrážok pohybujú od 249 mm do 723 mm s priemernou hodnotou v oblasti 497 mm (7,9 až 22,9 $l.s^{-1}.km^{-2}$, resp. 15,8 $l.s^{-1}.km^{-2}$), v oblasti južnej časti Podunajskej nížiny je to 26 – 130 mm s priemerom 64 mm (0,8 – 4,2 $l.s^{-1}.km^{-2}$, resp. 2,0 $l.s^{-1}.km^{-2}$). V oblasti Belianskych Tatier sú efektívne zrážky od 383 mm do 968 mm so strednou hodnotou 738 mm (12,1 – 30,7 $l.s^{-1}.km^{-2}$; 23,4 $l.s^{-1}.km^{-2}$), vo Východoslovenskej nížine 17 – 250 mm s priemerom 76 mm (0,5 – 7,9 $l.s^{-1}.km^{-2}$; 2,4 $l.s^{-1}.km^{-2}$). V prípade Malých Karpát s priemernou nadmorskou výškou 373 m dosahujú hodnoty efektívnych zrážok priemer 184 mm (5,9 $l.s^{-1}.km^{-2}$), v pohorí Branisko s o cca 450 vyšším priemerom nadmorskej výšky 825 m je to však len 138 mm (4,4 $l.s^{-1}.km^{-2}$) v dôsledku zrážkového tieňa Vysokých Tatier.

Treba však zdôrazniť, že takto vypočítaná hodnota efektívnych zrážok bola stanovená ako dlhodobý priemer pre roky 1951 – 1980 a nezohľadňuje odchýlky v klimatických charakteristikách jednotlivých rokov a iných období. Prezentované výsledky sú aplikovateľné iba pri regionálnych štúdiách väčšieho plošného dosahu a časového rozsahu, pre detailnejšie štúdie je potrebné korigovať priestorové hodnotenia zrážok a teplôt vzduchu s údajmi spracovanými v tejto oblasti na SHMÚ Bratislava. Ako už bolo spomenuté v úvode, podklady použité pre tento výpočet pozostávali z údajov o mesačných teplotách vzduchu z 98 klimatických staníc a mesačných zrážkových úhrnoch z 211 zrážkomerných staníc. V súčasnosti pozoruje Slovenský hydrometeorologický ústav teploty vzduchu na 105 klimatických staniciach a zrážkové úhrny na 680 zrážkomerných staniciach. Napriek ich pretrvávajúcej neekvivalentnej výškovej distribúcii s územím SR je jednoznačné, že tu existuje potenciál pre ďalšie spresňovanie údajov o priestorovej distribúcii zrážok a tým aj o distribúcii hodnôt potenciálnej a reálnej evapotranspirácie a efektívnych zrážok. Takisto bude vhodné v budúcnosti sa zamerať aj na časové rozdelenie efektívnych zrážok a na tomto základe sa pokúsiť charakterizovať väčšie plošné jednotky z hľadiska ich potenciálu pre doplňovanie množstiev podzemných vôd.

Samotné prerozdelenie efektívnych zrážok na povrchový a podzemný odtok závisí od hydraulických vlastností horninového prostredia a od morfologických charakteristík terénu, najmä od jeho sklonitosti. Pri využití poznatkov o plošnom odtoku podzemných vôd z väčšieho počtu povodí a poznatkov o geologickej stavbe a morfologickej skladbe povodí by v budúcnosti bolo možné dospieť k pomerne presným hodnotám koeficientu prerozdelenia povrchového a podzemného odtoku pre základné litologické typy a sklonitosti terénu.

Výsledkom geoštatistickej analýzy klimatických parametrov je súbor máp priemerných mesačných a ročných efektívnych zrážok pre celé územie Slovenska. Mapy vďaka svojej veľmi dobrej zhode s meranými hodnotami a vysokému rozlíšeniu, ktoré je možné ďalej zjemňovať, poskytujú hodnotný materiál predurčený na použitie v mnohých regionálnych i lokálnych hydrogeologických štúdiách.

Pri aplikácii metodických postupov na výpočet efektívnych zrážok boli vo veľkej miere využívané geografické informačné systémy, ktoré sa ukázali ako veľmi vhodný nástroj na vykonávanie detailných odhadov klimatických parametrov v priestore a poskytujú excelentné možnosti vizualizácie geoinformácií. Výsledné mapy sú vytvorené v univerzálnom rastrovom dátovom formáte, čím sa možnosti ich priamej aplikácie v GIS výrazne zvyšujú.

LITERATÚRA

Adam, J.C., Clark, E.A., Lettenmaier, D.P., Wood, E.F., 2006: Correction of Global Precipitation Products for Orographic Effects, J. Clim., 19(1), 15-38.

Atlas krajiny Slovenskej republiky. 1. vyd. Ministerstvo životného prostredia SR, Bratislava, Slovenská agentúra životného prostredia, Banská Bystrica, 2002, 344 s.

Auer, I., Böhm, R., Potzmann, R., Schöoner, W., Müller-Westermeier, G., Kveton, V., Cegnar, T., Dolinar, M., Gajic-Capka, M., Zaninovic, K., Maugeri, M., Brunetti, M., Nanni, T., Carrer, M., Mercalli, L., Majstorovic, Z., Begert, M., Moisselin, J.-M., Ceron, J.-P., Bochnicek, O., Zitari, B., Nola, P., 2005: A high resolution temperature climatology for the Greater Alpine Region (GAR). Proceedings of the 28th International Conference on Alpine Meteorology (23-27 May 2005, Zadar (HR)). In Croatian Meteorological Journal, 40, 593-596.

Bolstad, P.V., Swift, L., Collins, F., Régnière, J., 1998: Measured and predicted air temperatures at basin to regional scales in the southern Appalachian mountains. Agricultural and Forest Meteorology 91 161-176

Budyko, M. I. 1974: Klimat i žizň. Gidrometeoizdat. Leningrad, 1974.

Burroughs, P.P. & McDonnel, R.A., 1998: Principles of Geographic Information Systems, Oxford University Press, pp. 299.

Comrie, A.C. & Broylesz, B., 2002: Variability and spatial modeling of fine-scale precipitation data for the Sonoran Desert of south-west Arizona. Journal of Arid Environments 50: 573–592
Cressie, N.A.C., 1993: Statistics for spatial data. John Wiley & Sons, Inc., New York
Creutin, J.D. & Obled, C., 1982: Objective analyses and mapping techniques for rainfall fields: an objective comparison. Water Resour. Res., 18(2), 413-431.
Daly.C, Neilson R.P and Philips D.L, 1994: A statistical-topographical model for mapping climatological precipitation over mountainous terrain. Journal of Applied Meteorology 31, 661-676.
Gonzalez-Hidalgo, J.C., De Luis, M., Raventos, J., Sanchez, J.R., 2001: Spatial distribution of seasonal rainfall trends in a Western mediterranean area. Int. J. Climatol. 21: 843–860
Hevesi, J.A., Flint, A.L., Istok, J.D. 1992a.: Precipitation estimation in mountainous terrain using multivariate geostatistics. 1. Structural-analysis. Journal of Applied Meteorology, 31, 661-67
Hevesi, J.A., Flint, A.L., Istok, J.D. 1992b: Precipitation estimation in mountainous terrain using multivariate geostatistics. 2. Isohyetal maps. Journal of Applied Meteorology, 31, 677-688.
Hofierka J., Parajka J., Mitasova H., Mitas L., 2002: Multivariate Interpolation of Precipitation Using Regularized Spline with Tension. Transactions in GIS, Vol 6(2), 135-150.
Hrvoľ, J., Lapin, M., Tomlain, J., 2001: Changes and variability in solar radiation and evapotranspiration in Slovakia in 1951-2000. Acta Meteorol. Univ. Comen., XXX, 31-58.
Isaaks, E.H, Srivastava, R.M., 1989: Applied Geostatistics. Oxford University Press, New York
Kolektív autorov, 1991: Zborník prác Slovenského hydrometeorologického ústavu v Bratislave, Zväzok 33/I. Klimatické pomery na Slovensku. Vybrané charakteristiky. ISBN 80-05-00888-0, Vydavateľstvo Alfa, Bratislava, 208 s.
Kordík, J. 2003: Stanovenie prírodných pozaďových koncentrácií dusičnanov s využitím poznatkov o charaktere ich distribúcie v podzemných vodách Slovenska. Podzemná voda IX. / 2003 č. 1, Slovenská asociácia hydrogeológov, Bratislava, 5-13.
Kravchenko, A., Zhang, R., Tung, Y-K., 1996: Estimation of Mean Annual Precipitation in Wyoming Using Geostatistical Analysis. Proceedings WWRC-96-04. Proceedings of American Geophysical Union 16th Annual Hydrology Days, April 15-18, 1996, Fort Collins, Colorado, pp. 271-282.
Kullman, E., st., in Vrana, K., & Simpson, R., 2000: Koncept manažmentu povrchových a podzemných vôd v hraničnom regióne. Záverečná správa projektu ZZ 96 21.03. Manuskript – Archív Úradu vlády Slovenskej republiky. 133 s.
Kullman, E., st., Kissane. S., Šalaga, I., 1997: Evaluation of Groundwater Resources in Slovakia. PHARE Project No. EU/95/WAT/31. PM Consulting Engineers. Manuskript. Mininisterstvo životného prostredia Slovenskej republiky, 459 s.
Kullman, E., ml., Malík, P., Bodiš, D., Hornáčková-Patschová, A., Halabuk, A., Bujnovský, R., Holubec, M., Kútnik, P., Poráziková, K. 2005: Národná správa 2004, časť Podzemná voda, pripravená pracovnou skupinou Implementácia rámcovej smernice o vodách v oblasti podzemných vôd. Ministerstvo životného prostredia SR, 88 s.
Kullman, E., st., Bodiš, D., Jetel, J., Kovařík, K., Kullman, E., ml., Malík, P., 2002: Metodické postupy pri stanovovaní výpočtu množstiev podzemných vôd. In: Scherer, S. et al., 2004: Mezozoikum a paleozoikum SZ časti Považského Inovca, vyhľadávací hydrogeologický prieskum. Manuskript – Archív ŠGÚDŠ Bratislava, nestránkované
Li, S., Tarboton, D., McKee, M., 2003: GIS-based temperature interpolation for distributed modeling of reference evapotranspiration. Poster presented at 23rd AGU Hydrology Days, Fort Collins, Colorado, March 31 - April 2.
Novák, V., 2001: Evapotranspirácia a jej rozdelenia na území Slovenska. Zivotne prostredie, 3, ÚKE SAV Bratislava.
Parajka J., 1999: Mapping long-term mean annual precipitation in Slovakia using geostatistical procedures. Int. Conf. Problems in Fluid Mechanics and Hydrology, Institute of Hydrodynamics AS CR, 424-430.
Parajka, J., Szolgay, J., 1998: Grid-based mapping of long-term mean annual potential and actual evapotranspiration in Slovakia. IAHS-AISH Pub. 248, p.123-129.
Sitková, Z., 2000: Metodické aspekty priestorového rozloženia klimatických prvkov v horskej oblasti. Bioklimatológia a životné prostredie. XIII, Košice
Stahl, K., Moore, R.D., McKendry I.G., 2005: Lapse rates of climate variables for different atmospheric circulation conditions. Headwater 2005. Bergen, Norway. June 2005
Tabios, G.Q. & J.D. Salas, 1985: A comparative analysis of techniques for spatial interpolation of precipitation. Water Resour. Bull. 21:365–380
Thornthwaite, C.W., & Mather, J.R., 1955: The water balance. Publ. in Climatol. 8, s. 1 104
Thornthwaite, C.W., 1948: An approach toward a rational classification of climate. Geograph. Rew. 38, s. 55-94
Thornton, P.E., Running, S.W., White, M.A., 1997. Generating surfaces of daily meteorological variables over large regions of complex terrain. Journal of Hydrology, 190, 214-251.
Tomlain, J., 1997: Rozloženie evapotranspirácie na území Slovenska za obdobie 1961-1990. In:Podzemná voda, roč. 3, 1997, 1.- s. 5-23.
Tveito, O.E., 2002: Spatial distribution of winter temperatures in Norway related to topography and large-scale atmospheric circulation, PUB Kick off meeting, Brasilia, Brazil 20-22.November 2002
Tveito, O.E., Førland, E.J., Heino, R., Hanssen-Bauer, I., Alexandersson, H., Dahlström, B., Drebs, A., Kern-Hansen, C., Jónsson, T., Vaarby Laursen, E., Westman, Y., 2000: Nordic temperature maps (Nordklim), DNMI KLIMA Report No. 9
USGS, 2002: Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Elevation Dataset. U.S. Geological Survey, Sioux Falls, SD, http://srtm.usgs.gov/.
Ustrnul, Z. & Czekierda, D., 2005: Application of GIS for the development of climatological air temperature maps: an example from Poland. Meteorol. Appl. 12, 43–50

Van Dieppen C. And P. Van der Voet, 1998. Application of simple interpolation methods in agrometeorology. Proc. of the Cost 79 workshop "Dealing on Spatialisation". Toulouse, Sept 1996. EU Cost 79 publication. Edited by B. Gozzini. And M. Hims. Luxembourg, 1998. pp 3-18.
Vrana, K., & Malík, P. 2003: EU Nitrate Directive – identification of the vulnerable zones in the territory of Slovakia. Productional and Environmental Aspects of Nitrogen Use in Agricultural Land. Findings of heretofore research in China and Slovakia. Proc. Soil Science and Conservation Research Institute, Bratislava, 2003, 67-81.
Wackernagel, H., 1998: Multivariate Geostatistics. Springer, New York, Berlin, Heidelberg
Willmott, C.J. & Matsuura, K., 1995: Smart Interpolation of Annually Averaged Air Temperature in the United States. Journal of Applied Meteorology, 34, 2577-2586
Zubenok, L. I. 1976: Isparenije na kontinentach. Gidrometeoizdat. Leningrad, 1976

SPATIAL DISTRIBUTION OF MEAN EFFECTIVE PRECIPITATION OVER SLOVAKIA

SUMMARY

The effective precipitation is the essential part of any hydrogeological study involving estimation of recharging groundwater amounts. Since the effective precipitation is primarily defined by temperature and precipitation, both varying strongly with local geomorphology, a very careful approach in spatialization of data drawn from sparse meteorological stations must be taken. For this purpose a detrended kriging is recommended as a favourable method and its usefulness is proved on the territory of Slovakia in this study. To identify global trends in the two fundamental climatologic variables – temperature and precipitation, a stepwise regression is applied. Two positional and three geomorphological parameters were judged to be governing the global variation in these variables (Fig. 2). For the sake of mean potential evapotranspiration evaluation, the Thornthwait's (1948, 1955) method with monthly calculation steps was used. The results gained were subsequently entered into the calculation of real (actual) monthly evapotranspiration, where the response of precipitation totals and potential evapotranspiration to the change in soil water content was examined, which determines the real quantity of water evaporated from the surface.

When looking at the Figs. 10 and 11 we can realize that the most of the water wealth of Slovakia is created in Vysoké Tatry Mts., Malá and Veľká Fatra Mts., western part of the Nízke Tatry Mts. and Slovak Beskydy Mts. The high level of effective rainfall in Bukovské vrchy Hills (easternmost part) is also interesting. In these mountains, spatial averages of effective precipitation exceed 500 mm or even 700 mm. On the contrary, 60-70 mm of the average effective rainfall can be found in the lowlands. Some other contrary but expected discrepancies arise from comparing individual regions and their effective precipitation amounts.

Because only a part of the data from existing meteorological stations was available at the time of this study, a future work on including remaining stations and thus increasing the precision of effective rainfall distribution is necessary. In this study, monthly average air temperature data from 98 climatic stations and monthly average precipitation totals from 211 stations were used. The representative period for the results presented is 1951 – 1980. Nowadays, in the monitoring network of the Slovak hydrometeorological institute there are 105 climatic stations and 680 precipitation stations, what means an increased potential for better solutions in the future. Nevertheless, an altitudinal distribution of these stations still does not cover higher altitudes, where majority of effective precipitation takes place.

The practical consequence of assessing the mean effective precipitation for individual regions is appealing not only with respect to groundwater recharge, but also in solving quality problems. In this respect, the climatic pollution attenuation potential, e.g. diminishing of contamination by simple dilution, is of particular interest. The partitioning of the effective precipitation into surface- and groundwater runoff depends on hydraulic properties of rocks and local morphological characteristics, especially the slope. By using the knowledge about groundwater discharge in larger number of watersheds and information about geology and geomorphology of these, a very precise estimation of the rainfall separation for individual basic lithological types could be possible. Similarly, an increased effort must be taken towards the characterization of larger areas from the groundwater recharge point of view, which can be accomplished by accounting for the distribution of effective precipitation over time.