

УДК 556.166

Є.Д.Гопченко, д.г.н., М.Є.Романчук, к.г.н.,
Одеський державний екологічний університет

МАКСИМАЛЬНИЙ СТІК ДОЩОВИХ ПАВОДКІВ НА ТЕРИТОРІЇ ПРИЧОРНОМОРСЬКОЇ НИЗОВИНИ

У статті обґрунтовується новий підхід до нормування характеристик максимального стоку дощових паводків річок Причорноморської низовини.

Ключові слова: максимальний стік, дощові паводки, розрахункові характеристики, схиловий приплив, трансформація.

Вступ. Причорноморська низовина простягається від берегів Нижнього Дунаю до степових областей західних схилів Приазовської височини. Її південна межа проходить уздовж Чорного моря, по тиловому краю Присивашської терасової рівнини і омивається водами Азовського моря (між Ногайськом і Приморським). На півночі вона межує з фізико-географічною областю південних відрогів Молдавської височини, далі проходить по знижених відрогів Подільської височини, південних схилах Придніпровської височини і омивається водами Каховського водосховища. Переважаючими ґрунтами у степовій, а також у південній частині лісостепової зони є чорноземи. Утворились вони під покривом трав'янистої рослинності, представлені у лісостеповій зоні луковими ковильно-різнотрав'яними, а у степовій - різнотрав'яно-ковильними і типчакково-ковильними асоціаціями. Трав'янистий рослинний покрив цілинного степу в докультурний період розвитку чорноземів за умов сприятливого поєднання гідротермічного режиму, високої насиченості кальцієм і нейтральної реакції ґрунтового розчину обумовили значне накопичення у чорноземах гумусу, азоту, фосфору та інших речовин живлення, а також формування в них зернисто-дрібногрудкуватої структури з добрими воднофізичними властивостями. Середньорічна кількість опадів у середньому становить 480-520 мм, з них на теплий період припадає понад 280-320 мм. Зливові опади як один з основних факторів формування дощових паводків по території розповсюджуються досить нерівномірно. Найбільш визначні дощові паводки були зареєстровані у середній і нижній частинах р. Південний Буг 29.08.1947 року. Вони супроводжувались зливовими опадами у Вознесенську 140.8 мм, у Первомайську – 104,2 мм, в Олександрівці – 177 мм. Катастрофічним був також паводок дощового походження в районі м. Миколаєва. Тривалість зливи становила понад 2 години, під час якої випало 190.2 мм опадів. Високий дощовий паводок спостерігався у 2004 році в околицях м. Рені Одеської області. В більшості випадків визначні зливові паводки супроводжуються великими матеріальними збитками. Тому розрахунки характеристик таких паводків є надзвичайно актуальною проблемою. Але, на жаль, гідрологічна мережа пунктів спостережень за стоком річок у межах Причорноморської низовини занадто рідка, що завдає значних труднощів при побудові нормативної бази в галузі максимального стоку не лише паводків, але й весняних водопіль. З періодами спостережень більше 10 років тут налічується усього 30 водозборів з площами від 43.9 км² (р. Іква-с-мт. Стара Синява) до 16700 км² (р. Синюха-с.Синюхин Брід). Суттєвим недоліком цієї мережі є ще й те, що гідрологічні пости майже відсутні у її південній частині. Рівномірніше по території

й у більшій кількості (їх понад 70) розміщені пункти спостережень за атмосферними опадами. На підставі викладеного можна прийти до висновку, що при нормуванні характеристик максимального стоку, окрім гідрологічних даних, доцільним є використання матеріалів спостережень за опадами на метеорологічних станціях і постах. З наших міркувань, це сприяло б більш надійному обґрунтуванню розрахункових характеристик паводків, особливо маючи на увазі південну частину Причорномор'я.

Сучасні науково-методичні підходи до нормування характеристик максимального стоку дощових паводків. У діючому в Україні нормативному документі СНіП 2.01.14-83 розрахунки максимального паводкового стоку річок здійснюються в залежності від розмірів водозбірних площ річок:

а) при $F < 200 \text{ км}^2$ – за формулою граничної інтенсивності

$$q_p = A_{1\%} \eta H_{1\%} \lambda_p \delta_1, \quad (1)$$

де q_p – розрахунковий модуль стоку $P\%$ -ї ймовірності перевищення;

$A_{1\%}$ - максимальний модуль стоку 1% -ї ймовірності перевищення, чисельно співпадаючий з ординатами редуційних кривих опадів $\bar{w}(\tau)$ за проміжок часу τ ;

η - коефіцієнт паводкового стоку;

$H_{1\%}$ - добовий максимум опадів 1% -ї ймовірності перевищення;

λ_p - коефіцієнт забезпеченості;

δ_1 - коефіцієнт регулюючого впливу ставків і водосховищ на максимальний стік річок;

б) при $F > 200 \text{ км}^2$ – за емпіричною формулою редуційного типу

$$q_p = q_{200} (200 / F)^{n_1} \lambda_p \delta_1 \delta_2, \quad (2)$$

де q_{200} - приведений до площі $F=200 \text{ км}^2$ максимальний модуль паводкового стоку;

δ_2 - коефіцієнт для врахування впливу заболоченості водозборів на максимальний стік річок.

Розглядаючи (1) і (2), слід перш за все звернути увагу на відмінність використаних при розробці нормативних документів базових структур, що є не зовсім зрозумілим стосовно процесів, що відбуваються у гідрографічній мережі. З іншого боку, у деяких працях [1,2,3 й ін.] були висловлені застереження стосовно правомірності операторного співвідношення „опад-русловий стік” в (1) замість природного – „опад-схиловий приплив-русловий стік”. Це у свою чергу призвело до того, що часова редуційна крива середньої інтенсивності опадів $\bar{w}(\tau)$ необґрунтовано була використана як трансформаційна функція руслового розпластування паводків. Більш того, не зрозумілим слід вважати розрахунковий варіант тривалості опадів τ

$$\tau = 1.2 t_p^{1.1} + t_{cx}, \quad (3)$$

замість фізичної величини басейнового часу добігання паводкової хвилі τ_0 , причому

$$\tau_0 = t_p + t_{cx}, \quad (4)$$

де t_p – час руслового добігання;

t_{cx} – час схилового добігання.

Не задовольняє (1) верхнє граничне значення $q_m/q'_m = 1.0$ при $F=0$. Щоб переконатися у цьому, запишемо замість $H_{1\%} \cdot \eta = Y_m$, а потім чисельник і знаменник (1) домножимо на $\frac{n+1}{n} \frac{1}{T_0}$. У такому випадку (при $\lambda_p = 1.0$ і $\delta_1 = 1.0$)

$$q_{1\%} = \frac{n}{n+1} \bar{\psi}(\tau) \cdot T_0 \cdot q'_{1\%}. \quad (5)$$

Тоді

$$\frac{q_{1\%}}{q'_{1\%}} = \frac{n}{n+1} \bar{\psi}(\tau) \cdot T_0. \quad (6)$$

За умови $F=0$ розрахункова тривалість τ , згідно з (3), буде співпадати з t_{cx} , а

$$\frac{q_{1\%}}{q'_{1\%}} = \frac{n}{n+1} \bar{\psi}(t_{cx}) \cdot T_0, \quad (7)$$

тобто не відповідає верхньому граничному значенню (на рівні одиниці).

У формулі (2) штучно використовується модуль стоку q_{200} , тоді як базова структура редуційного типу повинна мати (у спрощеному варіанті) вигляд

$$q_m = \frac{q'_m}{(F+1)^{n_1}}, \quad (8)$$

де q'_m - максимальний модуль схилового припливу, зокрема

$$q'_m = \frac{n+1}{n} \frac{1}{T_0} Y_m, \quad (9)$$

$\frac{n+1}{n}$ - коефіцієнт часової нерівномірності схилового припливу;

T_0 - тривалість схилового припливу;

Y_m - шар стоку за паводок.

Щодо структур (2) і (8), то остання з них відповідає верхній границі, оскільки при $F=0$ співвідношення $q_m/q'_m = 1.0$. Приведемо до канонічного вигляду й (2), домноживши у правій частині чисельник і знаменник на q'_m . Тоді

$$\frac{q_{1\%}}{q'_{1\%}} = \frac{n}{n+1} \frac{T_0}{Y_m} \left(\frac{200}{F} \right)^{n_1} \cdot q_{200}. \quad (10)$$

За умови використання (2), тобто для перерізу $F=200 \text{ км}^2$,

$$\left(\frac{q_m}{q'_m} \right)_{F=200} = \frac{q_{200}}{q'_m}. \quad (11)$$

Таким чином, для будь-якого фіксованого значення $F=F_0$ співвідношення (11) буде становити

$$\left(\frac{q_m}{q'_m} \right)_{F=F_0} = \frac{q_{F_0}}{q'_m}. \quad (12)$$

Теоретичне вдосконалення розрахункової бази в галузі максимального стоку паводків. В [4] доводиться, що найбільш підходящою для обґрунтування структурної розрахункової бази є теорія руслових ізохрон. Вона дозволяє враховувати як особливості схилового припливу води до руслової мережі, так і трансформацію його під впливом розпластування паводкових хвиль і русло-заплавного регулювання. Вихідні рівняння мають вигляд [4]:

а) при $t_p < T_0$

$$Q_m = V \sum_{t_p} q'_t B_t \varepsilon_t \Delta t ; \quad (13)$$

б) при $t_p \geq T_0$

$$Q_m = V \sum_{T_0} q'_t B_t \varepsilon_t \Delta t , \quad (14)$$

де Q_m – максимальна витрата води;

q'_t – ординати редуційного гідрографа схилового припливу;

B_t – ширина річкових водозборів по ізохронах руслового добігання;

ε_t – коефіцієнт русло-заплавного регулювання;

Δt – розрахунковий крок у часі.

В інтегральному вигляді (13) і (14) запишуться наступним чином:

а) при $t_p < T_0$

$$Q_m = V \int_0^{t_p} q'_t B_t \varepsilon_t dt ; \quad (15)$$

б) при $t_p \geq T_0$

$$Q_m = V \int_0^{T_0} q'_t B_t \varepsilon_t dt . \quad (16)$$

При вирішенні (15) і (16) функції q'_t і B_t звичайно беруться у вигляді:

- гідрограф схилового припливу

$$q'_t = q'_m \left[1 - \left(\frac{t}{T_0} \right)^n \right] ; \quad (17)$$

- річковий водозбір з русловими ізохронами

$$B_t = B_m \left[1 - \left(\frac{t}{t_p} \right)^m \right] , \quad (18)$$

де q'_m - максимальний модуль схилового припливу;

B_m – максимальна ширина водозборів по ізохронах руслового добігання;

T_0 – тривалість схилового припливу;

t_p – тривалість руслового добігання паводкових хвиль.

Інтегрування (15) і (16) з урахуванням (17) і (18), а також деякі перетворення дають змогу отримати узагальнене рівняння

$$q_m = q'_m \Psi \left(\frac{t_p}{T_0} \right) \varepsilon_F , \quad (19)$$

де $\psi\left(\frac{t_p}{T_0}\right)$ - трансформаційна функція розпластування паводкових хвиль під впливом часу руслового добігання, причому:

а) при $t_p < T_0$

$$\psi(t_p / T_0) = 1 - \frac{m+1}{(n+1)(n+m+1)} \left(\frac{t_p}{T_0}\right)^n; \quad (20)$$

б) при $t_p \geq T_0$

$$\psi(t_p / T_0) = \frac{n}{n+1} \frac{T_0}{t_p} \left[\frac{m+1}{m} - \frac{n+1}{m(n+m+1)} \left(\frac{T_0}{t_p}\right)^m \right]. \quad (21)$$

З (20) можна визначити верхнє граничне значення $\psi\left(\frac{t_p}{T_0}\right)$, а з (21) – нижнє.

Дійсно, при $\frac{t_p}{T_0} = 0$

$$\psi\left(\frac{t_p}{T_0}\right) = 1.0, \quad (22)$$

а при $t_p \gg T_0$

$$\psi\left(\frac{t_p}{T_0}\right) = 0. \quad (23)$$

Наочне уявлення щодо функції $\psi\left(\frac{t_p}{T_0}\right)$ для умов паводкового стоку на річках Причорноморської низовини дається на рис.1 (при $n=0.4$ і $m=1.0$).

Зауважимо, що цей графік може бути використаний при здійсненні розрахунків максимального стоку дощових паводків на розглядуваній території в залежності від співвідношення t_p / T_0 (ліва частина рисунка) або T_0 / t_p (його права частина).

Базовим параметром формули (19) вважається модуль схилового припливу q'_m , який розраховується за допомогою рівняння (9). Воно спирається на такі характеристики схилового припливу як коефіцієнт часової нерівномірності схилового припливу $(n+1)/n$, тривалість припливу води зі схилів до руслової мережі T_0 і шару стоку Y_m . Але, як відомо, не завжди у достатній кількості є матеріали спостережень за стоком. Зокрема, це повною мірою відноситься до регіону Причорноморської низовини, де занадто рідка гідрологічна мережа постів. Тому замість (9) можна запропонувати дещо інший варіант для визначення q'_m , а саме

$$q'_m = 0.28 \frac{n+1}{n} \frac{1}{T_0} H_m \eta, \quad (24)$$

де q'_m - максимальний модуль схилового припливу, $\text{м}^3/\text{с}\cdot\text{км}^2$;

T_0 – тривалість схилового припливу (год), яка для умов усього Причорномор'я прийнята на рівні 2.5 год;

H_m – паводкоформуєчі опади;

η - коефіцієнт паводкового стоку;

$(n+1)/n$ – коефіцієнт нерівномірності схилового припливу у часі.

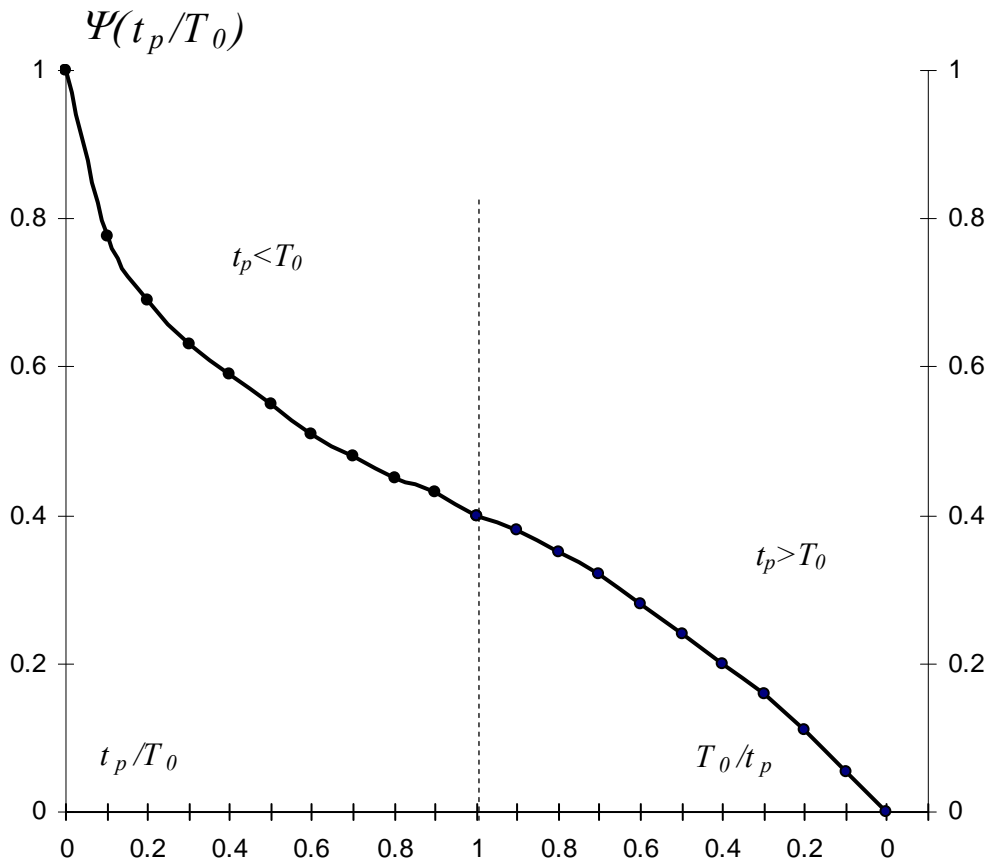


Рисунок 1 - Залежність коефіцієнта трансформації від співвідношення t_p/T_0 (при $t_p < T_0$) та T_0/t_p (при $t_p > T_0$).

Згідно з дослідженнями [5], для високих дощових паводків у межах півдня України $(n+1)/n = 3.5$.

З урахуванням $T_0 = 2.5$ год і $(n+1)/n = 3.5$ вираз (24) можна записати у вигляді

$$q'_m = 0.392 H_m \eta. \quad (25)$$

Методичне обґрунтування параметрів розрахункової формули.
 Приступаючи до визначення параметрів, що входять до (19), у першу чергу необхідно обґрунтувати ті з них, які описують q'_m у рівнянні (25). Звичайним в існуючій практиці є використання як H_m добового максимуму опадів. Розгляд матеріалів спостережень за зливовими опадами свідчить про те, що у межах степової зони дійсно добові опади є еквівалентом H_m . Тому у подальшому просторово-часовому аналізі були піддані максимуми опадів H_δ . Статистична обробка часових рядів H_δ по сукупності 71 пункту спостережень полягала у визначенні середніх величин \bar{H}_δ , коефіцієнтів варіації C_v і співвідношення C_s/C_v . Для регіону в цілому C_s/C_v дорівнює 3.0. Просторове узагальнення $(\bar{H}_\delta)_i$, де i – середні добові значення опадів по окремих пунктах спостережень за ними. Виявилось, що випадкова складова повної дисперсії поля $(\bar{H}_\delta)_i$ дещо більша від географічної. Це дозволило здійснити осереднення випадкового поля $(\bar{H}_\delta)_i$ і взяти його на рівні 37.9 мм. Ще більшою мірою ця вимога задовольняється при

розгляді поля коефіцієнтів варіації Cv_i . Їхнє середнє для регіону значення становить 0.47. За таких статистичних параметрів розрахунковий шар опадів 1%-ї ймовірності перевищення $H_{1\%}$, встановлений за допомогою кривої трипараметричного гамма-розподілу, дорівнює 98.2 мм. Але, як відомо, при статистичній обробці „точкових” значень опадів результати не можуть безпосередньо поширюватись на окремі водозбірні басейни, тим більш різних розмірів. Тобто стосовно річкових водозборів необхідно врахувати просторову неоднорідність розподілу опадів, особливо зливого характеру. Зокрема, здійснити це можливо за допомогою коефіцієнта редуції опадів k_n , а саме

$$(H_{1\%})_F = H_{1\%} \cdot k_n = 98.2k_n, \quad (26)$$

де $(H_{1\%})_F$ - середній шар опадів на площі F .

Найбільш ґрунтовні дослідження просторової редуції зливових опадів свого часу були проведені А.М.Бефані [6], який пропонує розраховувати k_n наступним чином:

- при $t_p < 1$ доби

$$k_n = 1 / (1 + 0.003F^{3/4}); \quad (27)$$

- при $t_p \geq 1$ доби

$$k_n = \frac{1}{1 + 0.0038 / (1 + 0.26t_p) F^{3/4}}. \quad (28)$$

Коефіцієнти стоку η , через відсутність необхідних вихідних даних для їхнього визначення, розраховувались зворотним шляхом з формули (19) і врахуванням (24), а потім були узагальнені в залежності від розмірів водозборів. Змінюються η від свого максимального значення на рівні 0.6 при $F=0$ до 0.41- при $F=0.41$ км² (табл.1).

Таблиця 1 – Коефіцієнти паводкового стоку η

		0							
F, км ²	0	10	50	100	200	500	1000	5000	10000
η	0.60	0.57	0.51	0.49	0.47	0.46	0.45	0.44	0.41

На підставі (25) і табл.1 можна встановити фізичний максимальний модуль схилового припливу $(q'_{1\%})_m$

$$(q'_{1\%})_m = 0.392 \cdot 98.2(k_n)_{F=0}(\eta)_{F=0} = 23.1, \quad (29)$$

де $(q'_{1\%})_m$ - максимальний модуль схилового припливу 1%-ої ймовірності перевищення, м³/(с·км²);

$$(k_n)_{F=0} = 1.0;$$

$$(\eta)_{F=0} = 0.60.$$

Трансформаційна функція розпластування $\psi(t_p / T_0)$ може визначатися безпосередньо за допомогою рис.1 в залежності тільки від співвідношення t_p / T_0 . Крім того, її можна розраховувати на основі рівнянь (20) і (21), які за відомих $(n+1)/n = 3.5$; $n=0.4$ і $m=1.0$, набувають розрахункового вигляду:

а) при $t_p < T_0$

$$\psi(t_p / T_0) = 1 - 0.41t_p^{0.4}; \quad (30)$$

б) при $t_p \geq 1.0$

$$\psi(t_p / T_0) = \frac{1.43}{t_p} \left(1 - 0.73 \frac{1}{t_p} \right). \quad (31)$$

Тривалість руслового добігання $t_p = L/V$, де L – гідрографічна довжина річки, може бути визначена за регіональною формулою швидкості V_∂ (км/год)

$$V_\partial = 1.30 F^{0.13} I^{0.33}, \quad (32)$$

де I – уклон головного русла, ‰.

Коефіцієнт русло-заплавного регулювання ε_F визначався зворотним шляхом з базової формули (19) за умови, що максимальний модуль схилового припливу $q_{1\%}$ розраховувався не за (24), а на основі (9). При цьому $(n+1)/n$ становив 3.5, тривалість схилового припливу $T_0=2.5$ год. Шари стоку $Y_{1\%}$ при використанні (9) були отримані по часових рядах максимальних витрат води Q_m . Узагальнення ε_F по території виконувалось в залежності від розміру водозборів. Для практичного використання розроблена допоміжна таблиця ε_F (табл.2).

Таблиця 2 – Коефіцієнти русло-заплавного регулювання ε_F

$F, \text{ км}^2$	0	2	5	10	50	100	500	1000	5000	20000
ε_F	1.0	0.66	0.48	0.37	0.23	0.21	0.18	0.16	0.13	0.11

Точність запропонованої методики знаходиться на рівні $\pm 20\%$, що відповідає якості вихідної інформації по максимальному стоку дощових паводків у межах Причорноморської низовини.

Висновки. На підставі аналізу нормативної бази по розрахунках максимального стоку дощових паводків в Україні виявлені суттєві її недоліки, головним чином теоретичного плану. Тому, використовуючи модель руслових ізохрон, було запропоновано більш досконалу розрахункову методику. Її основу становлять модулі схилового припливу, які можуть бути розраховані як по матеріалах стокових спостережень, так і по даних метеорологічної мережі станцій і постів. За обмеженості часових рядів спостережень за річковим стоком у межах Причорноморської низовини саме опади були використані як одна з розрахункових характеристик, обумовлюючих приплив води зі схилів до руслової мережі.

Запропонована науково-методична база доведена до рівня практичного використання замість застарілого нормативного документа СНіП 2.01.14-83, який до цих пір ще діє в Україні.

Список літератури

1. Гопченко Е.Д. Метод расчета максимальных расходов дождевых паводков с использованием кривых редукции средней интенсивности осадков во времени // Метеорология и гидрология. – 1972. - №10.- С.97-100.
2. Гопченко Е.Д. Некоторые проблемные вопросы расчета максимального паводочного стока. – ДАН СССР. – 1988. – Т.302. - №4. – С.955-957.
3. Гопченко Е.Д. О перспективах дальнейшего использования формул предельной интенсивности для расчетов максимального стока с малых водосборов // Метеорология и гидрология. – 1997. - №9.- С.104-111.
4. Гопченко Е.Д., Романчук М.Е. Нормирование характеристик максимального стока весеннего половодья на реках Причерноморской низменности. – К.: КНТ. – 2005. – 148 с.
5. Андреевская Г.М., Гопченко Е.Д., Овчарук В.А. О форме графиков притока воды со склонов в русловую сеть // Метеорология, климатология и гидрология. – 1996. – Вып.33. – С.106-110.
6. Бефани А.Н. Основы теории ливневого стока // Труды ОГМИ, 1958. – Ч.2. – Вып. 14. – 305 с.

Максимальный сток дождевых паводков на территории Причерноморской низменности.

Гопченко Е.Д., Романчук М.Е.

В статье обосновывается новый подход к нормированию характеристик максимального стока дождевых паводков рек Причерноморской низменности.

Ключевые слова: максимальный сток, дождевые паводки, расчетные характеристики, склоновый приток, трансформация.

The Maximal runoff of flood resulting from rain in territory Prichernomorskaya lowland.

Gopchenko E.D., Romanchuk M.E.

In the article the new approach to normalizing of the characteristics of the maximal runoff of flood resulting from rain for rivers of Prichernomorskaya lowland is.

Keywords: maximal runoff, floods, calculation descriptions, slope influx, transformation.