

Гопченко Є.Д.¹, Явкін В.Г.²

¹ *Одеський державний екологічний університет,*

² *Чернівецький національний університет*

ЛАНДШАФТНО-ГІДРОЛОГІЧНІ ОСНОВИ БАСЕЙНОВИХ ТА РУСЛОВИХ СИСТЕМ ПАВОДКОУТВОРЕННЯ

Ключові слова: стік, гідрологічний ландшафт, трансформація, дощовий паводок

Актуальність питання. В основі синтезу уявлень про систему формування паводка закладено такі підсистеми: зовнішнього обмеження (нижня межа системи); камера трансформації (перший оператор), – ґрунти та рослинний покрив; процеси ерозії на схилі та в руслі, руслові деформації при паводкових витратах відповідної забезпеченості; антропогенний тиск на водозбір і русло.

Використовуються методи пошуку й аналізу генеральних і фрагментарних залежностей, аналогії та порівняння окремих регіональних складових. Основним методом дослідження є ранжування факторів паводкоутворення. Він реалізується поряд зі стохастичними оцінками окремих чинників стокоформування.

Підготовка надійних і об'єктивних методів розрахунку та прогнозу стоку потребує використання великої кількості експериментальних досліджень інфільтраційного, дифузійного, фільтраційного процесів у відповідних специфічних проявах ґрунтової, рослинної чи господарської особливостях формування стоку. Вони створюють суттєву нелінійність трансформації об'ємів стікаючої по схилу води в схилу витрату. Проте, елементарна інтерполяція між експериментальними вимірами не дозволяє достатньо точно визначити середнє значення предикторів моделі, і похибка, що виникає, приховується деякий час в оптимізованому параметрі.

Аналіз попередніх досліджень. Концептуально фізико-математична модель формування паводку визначає відповідні поверхневі чи ґрунтові параметри стоку чисельною повторюваністю оберненої задачі і, з цієї точки зору, може розглядатися як метод ітерації. Виконується важливе завдання моделі – пояснення процесу формування паводку. На жаль, параметри багатьох видів моделі, що підібрані розв'язком зворотної задачі та позитивно діють під час розрахунку гідрографа тільки в басейні, для якого оптимізувалися сталі і, можливо, зміна характеристик дощу змінює і саму величину прийнятого коефіцієнта. Останнє особливо помітне при моделюванні гідрографу паводку в басейнах із суттєвим господарським навантаженням чи специфічним мозаїчним розподілом потенційно-стокоформуєчих ділянок [10–12].

Загалом фізико-математичне моделювання стоку дощових паводків досить широко представлено складовими моделями із зосередженими параметрами, що описують трансформацію паводкових вод на схилі лінійною функцією.

Предиктори цієї моделі безперервно змінюються в часі і просторі. Серед інших модель ТОРКАРІ (TOPographic Kinematic Aproximation and Integration) та її програмна реалізація ТОРКАРІ-ІПММС. Базуючись на головній вхідній ГІС-інформації моделі – цифровій карті висот (DEM, Digital Elevation Model), водозбір розглядається як сукупність квадратних елементів (комірок), що утворюють розрахункову сітку моделі.

Такий підхід властивий всім моделям формування стоку, де параметри є розподіленими. Аналогічні : Стенфордська (США), Танкова (Японія) та інші моделі [1, 5]. Розроблена в УкрНДГМІ версія моделі ГМЦ досить успішно адаптує ландшафтні характеристики гірських районів при оцінці предикторів та параметрів моделі [6,7].

Особливо низькою при використанні детермінованих моделей є якість визначення максимальної витрати гідрографа паводку. Інакше кажучи, часова тенденція гідрографа ще зберігає аналог природи, проте розрахункову максимальну витрату паводку (що є найважливішою задачею інженерної гідрології) за допомогою детермінованих моделей (чи зосередженими, чи з розподіленими параметрами) вирішити неможливо.

При розрахунку максимального стоку з використанням нормативів СНиП 2.01.14-83 чи з використанням нового стандарту СП-33-101-2003 проявляється суттєва невідповідність величин предиктантів, розрахованих за заданою методикою для паводків чи повеней із матеріалами реальних спостережень. Особливо у випадках, коли параметри підстильної поверхні суттєво мозаїчні чи просто відмінні від так званих типізованих у конкретному регіоні. В останньому вже відсутній комплекс картографічних додатків, що практично унеможливує врахування регіональної специфіки процесу формування паводку. Для більшості регіонів України спеціалістами ОДЕКУ системою динаміко-стохастичної двооператорної моделі підготовлено уніфіковану структурно-розрахункову базу для нормування характеристик максимального стоку паводків і водопіль [2–4].

Викладення основного матеріалу. Аналіз і узагальнення всієї історії розвитку розрахунку максимального паводкового стоку, в т.ч. в Україні, дозволяє стверджувати про необхідність розробки та введення в Україні нових нормативних напрямів на базі двооператорної моделі ОДЕКУ, яка відрізняється достатнім універсалізмом, зберігає в ланцюговій послідовності генетичні етапи формування максимуму та, головне, оперує напрацьованим у межах України необхідним номограмним і картографічним матеріалом.

Маловивченою ланкою системи опади - схил водозбору - русло вважається ґрунтовий шар басейнів, усередині якого і відбуваються найбільш важливі процеси, що формують втрати схилового стоку і схиловий гідрограф. Дискретні вимірювання вологості ґрунту в часі змушують вдаватися до розрахункових методів визначення продуктивної вологості, а нестача

інформації про просторове поле вологості вдається усувати за допомогою виділення меж стокоформуючих комплексів, усередині яких вертикальні профілі агрогідрологічних констант можна приймати за квазіоднорідні.

Існує залежність коефіцієнта фільтрації від інших фізико-механічних властивостей ґрунту.

Але й останні уявлення досить схематичні. Насправді процес виникнення схилового притоку тільки відкритого схилу охоплює, на першій стадії утворення, в більш зволоженій перед дощем прирусловій частині водозбору підповерхневе, а в деякі короткі інтервали часу і поверхневе стікання, формування надлишкового зволоження мікроповерхонь від'ємних форм рельєфу, заповнення дефіциту ґрунтової вологи випуклих поверхонь схилу і виникнення горизонтальної складової внутрішньогрунтового стоку до насичення ґрунту [9].

Можна припустити [13] наявність деякої горизонтальної складової фільтрації води у ґрунт на схилі, пропорційній нахилу поверхні (I) і пористості ґрунту W_n (пересічному гідравлічному радіусу горизонтального внутрішньогрунтового потоку) (1) :

$$V = f(U, W_n, I). \quad (1)$$

Тут U - вбирання, V - швидкість.

У цьому випадку прируслові ділянки схилу досягають стану насичення значно раніше, ніж усувається дефіцит вологості ґрунту всього схилу і надходження води в русло починається майже одночасно з появою дощу (рис.1).

Вологоперенос у ґрунті можна записати при деяких допущеннях рівняннями Нав'є-Стокса для руху рідини в пористому середовищі:

$$\frac{dU_x}{dt} = \frac{\phi \partial P}{\rho \partial X} - g \phi \frac{\partial h}{\partial x} + V \nabla^2 U_x, \quad (2)$$

$$\frac{dU_y}{dt} = \frac{\phi \partial P}{\rho \partial y} - g \phi \frac{\partial h}{\partial y} + V \nabla^2 U_y, \quad (3)$$

$$\frac{dU_z}{dZ} = \frac{\phi \partial P}{\rho \partial Z} - \frac{g \phi}{1} + V \nabla^2 U_z, \quad (4)$$

де U_x, U_y, U_z - швидкість руху води в ґрунті вздовж осей X, Y, Z ; ϕ - пористість (співвідношення об'єму пор до загального об'єму ґрунту); ρ - густина рідини, P - тиск ґрунтової вологи; g - прискорення сили тяжіння; h - висота верхньої межі рідини; V - кінематичний коефіцієнт в'язкості; ∇ - оператор Лапласа.

Після ряду допущень з використанням рівняння стану і рівняння нерозривності отримуємо розв'язок (закон Дарсі) [8]:

$$U_x = -k_x \frac{\partial \varphi}{\partial x}, \quad (5)$$

$$U_y = -k_y \frac{\partial \varphi}{\partial y}, \quad (6)$$

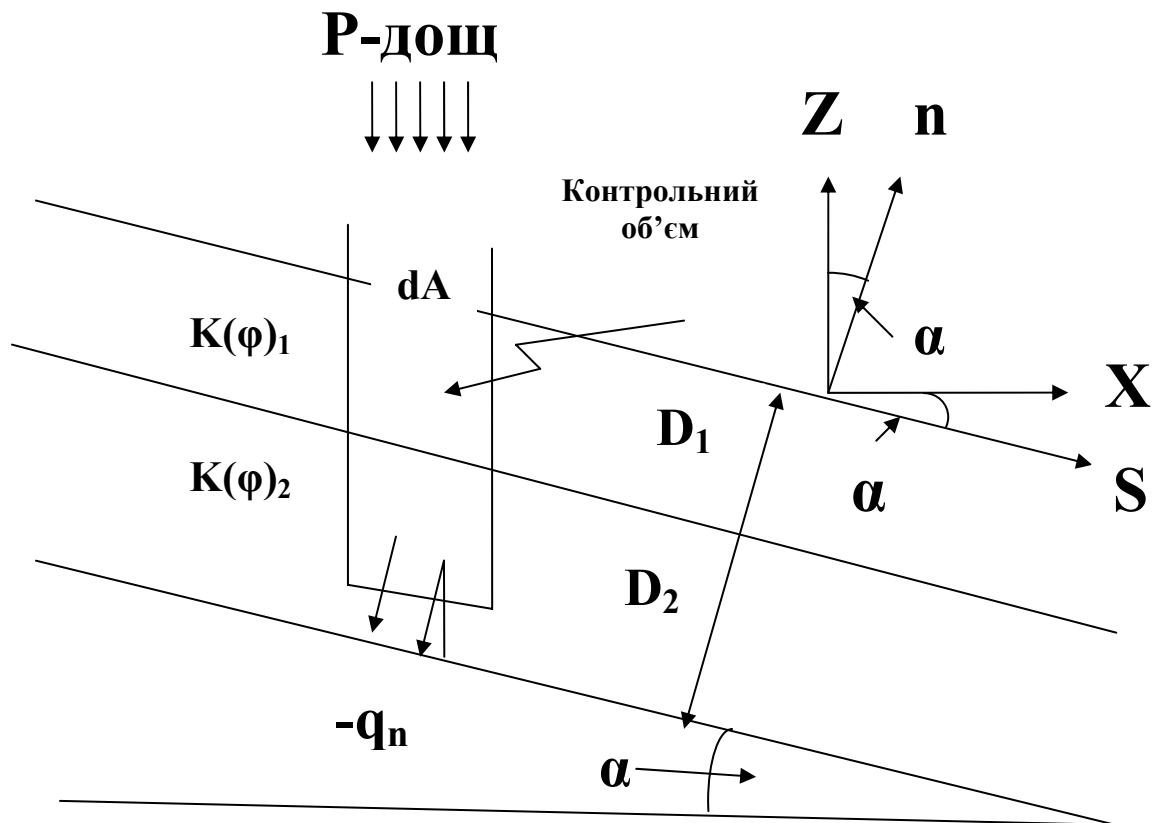
де k_x, k_y - коефіцієнти пропорційності;

$$\varphi = Z + \frac{P}{\rho g} = Z + \frac{P}{\lambda}. \quad (7)$$

За своїм значенням λ близьке до п'єзометричного тиску. Під час насичення середовища його величина дорівнює гідравлічному тиску у виразі (7). Використання виразів (5) і (6) обмежено через складність визначення потенціалу, а вираз (7) досить широко застосовується для оцінки вертикального переміщення вологи.

Рівняння (7) - закон Дарсі – вводиться, як правило, в модель вбирання вологи в ґрунт при моделюванні із розподіленими чи зосередженими параметрами.

Використані в (5–7) коефіцієнти та гідравлічна провідність взаємозв'язані між собою. З урахуванням похилу схилу мікродозбору в кожній точці поверхні можна розкласти вектор потенціалу ґрунтової вологи, припускаючи, що водно-фізичні властивості ґрунту виміряні по осі n - перпендикулярній напрямку схилу (рис. 1).



X, Z, n – осі координат, P – дощ, α – нахил схилу, $K(\phi)$ – фільтрація в шари ґрунту, D – товщина шару ґрунту, S – напрям схилу, q_n – підземний відтік

Рис.1. Ґрунтова колонка у формуванні стоку на схилі

Якщо паралельним напрямку схилу вважати вектор S , а властивості ґрунту змінюються в напрямку n , то можна припустити, що $\frac{\partial \varphi}{\partial s} = 0$ і $\frac{\partial k}{\partial s} = 0$, а тоді із закону Дарсі отримати:

$$q_s = k \sin \alpha, \quad (8)$$

$$q_n = k \left(\frac{\partial \varphi}{\partial n} + \cos \alpha \right), \quad (9)$$

де вісь Z , як і вісь n спрямовані вгору; $k(n, \varphi)$ дорівнює гідравлічній провідності; φ - гідростатичний тиск; $(q_s), (q_n)$ - питомі потоки вздовж напрямків S і n ; α - нахил поверхні.

З урахуванням напрямків X і Y потоки гідравлічної провідності і потенціалу ґрунтової вологи дорівнюють:

$$q_x = -k \frac{\partial \varphi}{\partial n} \sin \alpha_x, \quad (10)$$

$$q_y = -k \frac{\partial \varphi}{\partial n} \sin \alpha_y, \quad (11)$$

$$q_z = -k \left[\frac{\partial \varphi}{\partial n} (\cos \alpha + 1) \right], \quad (12)$$

де q_x, q_y, q_z - питомі потоки вздовж осей X, Y, Z .

З вертикального потенціалу ґрунтової вологи, тобто за допомогою характеристики $\frac{\partial \varphi}{\partial Z}$ ці потоки визначаються як:

$$q_x = -k \frac{\partial \varphi}{\partial Z} \operatorname{tg} \alpha_x, \quad (13)$$

$$q_y = -k \frac{\partial \varphi}{\partial Z} \operatorname{tg} \alpha_y, \quad (14)$$

де вісь Z спрямована вгору. Для сталого руху з урахуванням опадів і питомого потоку по осі Z для потоків по осях X і Y рівняння (13) і (14) можна перетворити:

$$q_x = (q_z + k) \operatorname{tg} \alpha_x = (k - P) \cos^2 \alpha_x \operatorname{tg} \alpha_x, \quad (15)$$

$$q_y = (q_z + k) \operatorname{tg} \alpha_y = (k - P) \cos^2 \alpha_y \operatorname{tg} \alpha_y, \quad (16)$$

де P - інтенсивність опадів на горизонтальну поверхню. При нахиленому положенні шарів ґрунту сила гравітації спрямована до основних координатних осей n і S під кутом α , а компонент стоку, паралельний напрямку дощу, співвідноситься величиною $\operatorname{tg} \alpha$. Пересічна складова горизонтального стоку при сталому режимі співвідноситься з дощем

величиною $\left(\frac{k_x}{P} - 1\right) \cos^2 \alpha$, а з складовою вертикального стоку $\left(-\frac{k_x}{q_z} - 1\right)$.

Горизонтальний потік призводить до концентрації вологи в увігнутих зниженнях (від'ємних формах рель'єфу), що створює перезволоження, наприклад, прируслової частини схилів.

Анізотропію ґрунту можна оцінити кривими водно-фізичних властивостей ґрунтів і зв'язком цих характеристик з потенціалом ґрунтової вологи і гідравлічною провідністю $\frac{\partial \varphi}{\partial z}, k(\varphi)$.

Особливо складне завдання в гідрології - визначення питомої провідності в ненасиченому потоці, - з певними обмеженнями виконується за допомогою викладених вище виразів.

Висновки. Стікання води по схилу залежить від довжини і крутизни схилів і шорсткості поверхні. Практично повсюди схиловий стік здійснюється підповерхневим, тобто внутрішньогрунтовим шляхом і шорсткість схилу визначається механічними і водно-фізичними властивостями ґрунтів.

Нижньою межею умови водності в руслі, - межею потенційного паводкового гідрографа (в першу чергу нуля гілки підйому паводка), є меженна передпаводкова витрата. Просторові узагальнення останньої зручно будувати нормативними величинами межені: модулями мінімальної витрати 80% або 95% забезпеченості.

Уся система паводкоутворення в басейні тоді замикається чинниками схилового гідрографа (насамперед нахилом і розчленуванням поверхні), вологопереносом у ґрунті та певним нормованим мінімальним стоком (рухлива волога у ґрунті дорівнює «0»).

Власне задача вибору об'єктивної математичної моделі формування стоку сьогодні, на наш погляд, більш оптимально сформульована та розв'язана у побудові співвідношень водно-тепlobалансових рівнянь за короткі інтервали часу, адаптації певних концептуальних, як, власне, і фізико-математичних моделей річкового стоку до відповідних регіональних природно-господарських умов.

Пошуки ж удосконалення відомих нормативів із короткострокового прогнозу, загальний розвиток гідрології річок переконують у необхідності кількісної інтерпретації ландшафтних характеристик – параметрів моделі формування стоку.

Узагальнення кількісних ознак окремих складових басейну та русла має виконати гідрологія ландшафтів – розділ гідрології, який займається дослідженням закономірностей географічного розподілу характеристик, що визначають гідрологічний режим території, тобто параметрів моделей формування стоку.

Система ландшафтної гідрології формується мінімально трьома провідними галузевими підсистемами: басейн, русло, режим стоку. В межах першої ранговими одиницями вищого рівня є типи поверхонь, – аналог ландшафтних зон у гірській вертикальній ярусності або ж, можливо, фізико-

географічних провінцій рівнини. Наступні – ступінь господарської засвоєності; ще нижче – розрахункова модельна ділянка; нарешті, найнижчим стає розрахунковий пункт.

Провідною трансформаційною камерою всього процесу формування стоку є діяльний шар ґрунту. Значущість цього показника очевидна в усіх підсистемах; охоплює більшу частину блоків математичних моделей.

У межах тільки окремої ґрунтової колонки виникають ще, як мінімум, три вертикальні підсистемні рівні: приповерхневий шар (на глибині вузла кушіння); “діяльний” шар; відносний водоутримуючий шар (зона переходу до підземних вод). Провідними трансформаційними чинниками є структура ґрунту та його гранулометричний і генетичний характер ґрунту.

У якості параметрів ґрунту прямо проявляються агрогідрологічні константи (вологість в’янення; найменша та повна польова вологомісткість), а також коефіцієнт фільтрації ґрунтової колонки, фільтрація води у відносний водоутрим). Опосередковано властивості ґрунту разом з кліматичними умовами передаються параметрами статистичних розподілів (дисперсія, асиметрія, коефіцієнти рівняння регресії між вологою окремих шарів ґрунту). Матриця комбінації цих параметрів і є числовою ознакою відповідного виду ґрунту.

Найвищий ранг руслової складової ландшафтно-гідрологічної системи – ділянка потоку з однотипним русловим процесом (гідроморфологічна ознака). Супутником руслового типу є провідні гідравлічні ознаки ділянки русла. Наступна структурна одиниця – руслова гряда; а елементарна – гранулометричний зміст донних відкладів.

Задача розвитку нормативної бази розрахунків паводків серед інших вимагає і процедури створення методичних основ ландшафтно-гідрологічного аналізу процесів паводкоутворення, визначення впливу техногенних навантажень на басейнові та руслові підсистеми формування та трансформації паводків:

- розробки систем географічних ознак процесу паводкоутворення;
- виконання ландшафтно-гідрологічного картування основних фізико-географічних чинників усіх компонентів балансу паводка на водозборі;
- розробки й узгодження з природними особливостями регіону комплексу критеріїв процесу вологопереносу в ґрунті (фільтрації та випаровування);
- на основі аналізу багатолітніх процесів господарювання виявлення ступеня впливу рівнів басейнової перетвореності на основні параметри гідрографа;
- визначення реальних розмірів схилу, як одного з провідних вхідних елементів у моделі доруслового паводкоутворення;
- оцінку вертикальної ерозії в руслі;
- систематизацію прояву паводкових витрат руслоформування.

Список літератури

1. *Бойко О. В.* Впровадження розподіленої моделі опади-стік для прогнозування стоку річок Закарпаття і басейну і басейну Прип'яті / О. В. Бойко, М. Й. Железняк // Гідрологія, гідрохімія, гідроекологія : мат. 5-ої Всеукр. наук. конф. (Чернівці, 22-24 вересня 2011 р.). – Чернівці, 2011. – С. 18-19.
2. *Гопченко Є. Д.* Проблеми підготовки нормативних документів по розрахунках максимального стоку річок України / Гопченко Є. Д., Романчук М. Є., Овчарук В. А. // Гідрологія, гідрохімія, гідроекологія : мат. 5-ої Всеукр. наук. конф. (Чернівці, 22-24 вересня 2011 р.). – Чернівці, 2011.- С. 40-41.
3. *Гопченко Е. Д.* Некоторые проблемные вопросы расчёта максимального паводочного стока / Е. Д. Гопченко // ДАН СССР. – 1988. – Т. 302, №4. – С. 955-957.
4. *Гопченко Є. Д.* До побудування нової нормативної бази в галузі максимального стоку на річках України / Е. Д. Гопченко, М. Є. Романчук // Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. – 2001. – Т. 2. – С. 219-225.
5. *Кучмент Л. С.* Формирование речного стока / Кучмент Л. С., Демидов В. Н., Мотовилов О. Г.– М. : Наука, 1983. – 216 с.
6. *Лук'янець О. І.* Ландшафтні характеристики як основа оцінювання параметрів математичних моделей формування стоку води / О. І. Лук'янець // Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. – 2003. – Вип. 5. – С. 78-84.
7. *Соседко М. Н.* Применение математической модели формирования дождевого стока с распределенными параметрами при краткосрочном прогнозировании паводков в горных районах / М. Н. Соседко, О. И. Лукьянец // Труды УкрНИГМИ. – 1993. – Вип. 245. – С. 29-39.
8. *Явкин В. Г.* Расчет потерь паводочного стока при недостаточной гидрометеорологической информации / В. Г. Явкин, А. Ф. Гордиенко // Метеорология, климатология и гидрология. –1986. – Вип. 22. –С. 76-79.
9. *Явкин В. Г.* Детерминированная модель дождевых паводков в горах / В. Г. Явкин // Мат. V Всесоюз. Гидрологич. съезда. Т.6. "Теория и методология гидрологических расчетов". – Л. : Гирометеоиздат, 1989. – С. 289-293.
10. *Явкін В. Г.* Вплив антропогенної перетвореності басейнів подільських приток Дністра на криву спаду паводку / В. Г. Явкін, А. А. Мельник // Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія.– 2010. – Т. 2 (19). – С. 65-73.
11. The use of the linear reservoir concept to quantify the impact of changes in land use on the hydrology of catchments in the Andes / [W. Buytaert, B. De Bievre, G. Wyseure and J. Deckers] // Hydrology and Earth System Sciences. – 2004. – 8(1). – P. 108-114.
12. *Inoue H.* Physical properties of water flow in a clayey agricultural field including shrinkage cracks / Inoue H., Nogyo K., Kenryu H. // Bull. Nat.Res. Inst. Agr. Eng. – 1992. – No.31. – P. 77-96, 100-119.
13. *Zaslavsky D.* Surface hydrology : II Distribution of raindrops / Zaslavsky D., Sinai G. // J. Hydraulics Divis. – 1981. – No. 107. – P. 37-52.

Ландшафтно-гідрологічні основи басейнових та руслових систем паводкоутворення

Гопченко Є., Явкін В.

В основі синтезу ідей про формування басейнових та руслових систем паводкоутворення закладено певні підсистеми. Їх складові визначають властивості гідрологічних ландшафтів. Останні є провідним інструментом детермінованих моделей із зосередженими чи розподіленими параметрами.

Ключові слова: стік, гідрологічний ландшафт, трансформація, дощовий паводок.

Ландшафтно-гідрологіческие основы бассейновых и русловых систем паводкообразования

Гопченко Е., Явкин В.

В основе синтеза идей о формировании бассейновых и русловых систем паводкообразования заложены определенные подсистемы. Их составляющие определяют свойства гидрологических ландшафтов. Последние являются ведущим инструментом детерминированных моделей с сосредоточенными или распределенными параметрами.

Ключевые слова: сток, гидрологичный ландшафт, трансформация, дождевой паводок.

Basis river basin landscape-hydrological of flash flood genesis systems

Gopchenko E., Yavkin V.

In basis of the synthesis of ideas about the formation of the flood, laid a set of specific subsystems. Form a significant part the components of hydrological landscape. They determine the spatial distribution parameters of the flood.

Key words: *flood, hydrological landscape, transformation, rain flow.*

Надійшла до редколегії 16.11.2011