

3. Мартынюк, А. А. Хаотическая потеря предельного цикла в задаче Вольтерра [Текст] / А. А. Мартынюк, Н. В. Никитина // Докл. АН Украины. – 1996. – № 4. – С. 1–7.
4. Hayashi, C. Bifurcations and the Generation of Chaotic States in the Solutions of Nonlinear Differential Equations [Text]: Докл. Кн. 1/ С. Hayashi, Н. Kawakami // Теоретическая и прикладная механика. – Варна, София, 1981 – С. 537–542.
5. Hoppensteadt, F. Predator-prey model [Text] / F. Hoppensteadt // Scholarpedia. – 2006. – № 1(10). – 1563 с.
6. Brauer, F. Mathematical Models in Population Biology and Epidemiology [Text] / F. Brauer, C. Castillo-Chavez, Springer-Verlag, 2000. – 201 p.
7. Сорокин, П. А. Моделирование биологических популяций с использованием комплексных моделей, включающих в себя индивидуум-ориентированные и аналитические компоненты [Текст] : дис. ... канд. физ.-мат. наук / П. А. Сорокин. – Долгопрудный, 2004. – 153 с.
8. Arditi, R. How Species Interact: Altering the Standard View on Trophic Ecology [Text] / R. Arditi, L. R. Ginzburg. – Oxford University Press, 2012. – 112 p.
9. Гусятников, П. П. Качественные и численные методы в задачах оптимального управления в моделях хищник-жертва и популяции леммингов [Текст] : дис. ... канд. физ.-мат. наук [Текст] / П. П. Гусятников. – Москва, 2006. – 101 с.
10. Nasritdinov, G. Limit cycle, trophic function and the dynamics of intersectoral interaction [Text] / G. Nasritdinov, R. T. Dalimov // Current Research J. of Economic Theory. – 2010. – № 2(2). – С. 32–40.
11. Эрроусмит, Д. К. Обыкновенные дифференциальные уравнения. Качественная теория с приложениями [Текст] / Д. К. Эрроусмит, К. М. Плейнс. – М.: Мир, 1986. – 243 с.
12. Арнольд, В. И. Дополнительные главы теории обыкновенных дифференциальных уравнений [Текст] / В. И. Арнольд. – М.: Наука, 1987. – 304 с.

Запропонована методика прогнозування рівня паводкових вод на основі побудови апроксимуючих кривих з використанням статистичних даних як про рівень води рік під час паводку (повеней), так і про метеорологічні дані. Дана методика також дозволяє проводити дослідження взаємозв'язку рівня паводкових вод і метеорологічних даних для виявлення вагомих факторів впливу на їх підняття

Ключові слова: рівень паводкових вод, метеорологічні дані, апроксимуючі криві, методика прогнозування

Предложена методика прогнозирования уровня паводковых вод на основе построения аппроксимирующих кривых с использованием статистических данных как об уровне воды рек во время паводка (наводнения), так и о метеорологических данных. Данная методика также позволяет проводить исследования взаимосвязи уровня паводковых вод и метеорологических данных, с использованием коэффициента контингенции для выявления значимых факторов влияния на их поднятия

Ключевые слова: уровень паводковых вод, метеорологические данные, аппроксимирующие кривые, методика прогнозирования

УДК 514.166.06

МЕТОДИКА ПОБУДОВИ АПРОКСИМУЮЧИХ КРИВИХ ДЛЯ ОЦІНКИ І ПРОГНОЗУВАННЯ РІВНЯ ПАВОДКОВИХ ВОД

О. І. Клапоушак

Аспірант

Кафедра комп'ютерних технологій в
системах управління і автоматики
Івано-Франківський національний
технічний університет нафти і газу
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ,
Україна, 76019

E-mail: oksana_kl@meta.ua

1. Вступ

Негативний вплив від паводків (повеней) спостерігається як в Україні (2008 р. – 2013 р.) [1 – 3], так і за кордоном зокрема, а саме: Китай (2008 р., 2013 р.) [4,

5]; Велика Британія, Іспанія, Франція, Італія (2013 р., 2014 р.) [6] та Німеччина [7], тому задачі прогнозування і контролю рівня паводкових вод залишаються актуальними і надалі, оскільки середньорічні збитки від паводків у 1995 – 1998 роках склали 899.3 млн грн.,

1999 – 2007 роках – понад 1500 млн грн., а у 2008 році – близько 6 млрд грн. [1, 9], 2009 р. – 6 млрд грн., середньорічний збиток від паводків у 2010 склав 170 млн грн. і в Україні тільки за 2008 постраждало 150000 чол.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Відомими є метод прогнозування паводкових вод та оцінки ризику затоплення в географічній зоні з урахуванням однієї змінної клімату по географічному районі [8], а також метод прогнозування паводкових вод на основі атмосферних опадів. Вихідна величина отримується з радару і на основі інтенсивності опадів здійснюється прогноз про виникнення паводків чи повеней [9].

У [10] запропонований метод, який дозволяє здійснити прогнозування паводкових вод з використанням моделі “rainfall-runoff-flood routing calculation”, що реалізується незалежно від історичних гідрологічних даних. Застосовується до водозборів без історичних даних.

Є відомим також метод прогнозування паводкових вод на основі геоприв'язки до району з вказуванням метеорологічних умов і надання відомостей про шлях проходження паводку [11].

В [12] описується спосіб прогнозування часу настання паводку і прогнозування його рівня, який здійснюється на основі статистичних даних про рівень води та температуру повітря за визначений термін з використанням нейронної мережі.

Також існує метод прогнозування паводкових вод на основі таких вихідних величин як атмосферні опади, тривалість паводків, площі та форми басейну на основі штучної нейронної мережі [13].

Згідно [14] виділяють такі методи прогнозування паводкових вод:

- детермінований, який основним фізичним феноменом виникнення паводкових вод вважає проникнення атмосферних опадів у басейн ріки;

- імовірнісний метод, який розглядає паводки як випадковий (раптовий) потік води, який виникає протягом певного періоду і декілька раз, і може бути прогнозований за допомогою статистичних пакетів.

Детермінований метод в свою чергу поділяється також на наступні методи [14]: емпіричний та метод базового процесу.

Емпіричний метод використовується для розрахунку витрат паводкових вод, що використовує одну з формул описаних нижче і базується на одному з параметрів властивостей ґрунтових вод (Gray and Wigham, 1970).

Дані емпіричні методи місять деякі недоліки, а саме: врахування малої кількості показників гідрометеорологічних процесів та неможливість дослідження взаємозв'язку між інтенсивністю опадів та стоком [14].

Метод базового процесу включає в себе дві послідовні дії: перша – визначення витрат паводкових вод з атмосферних опадів, друга дія – побудова гідрографів (зміни витрат паводкових вод в часі) [14].

Імовірнісний метод застосовується для дослідження повторюваності виникнення паводкових вод T_r з використанням формули Weibull:

$$T_r = \frac{N+1}{m}, \quad (1)$$

де N – загальна кількість паводків, m – ранг паводкових вод [14].

Існують також наступні методи екологічного моніторингу для контролю і прогнозування паводкових вод:

- дистанційний метод використовує космічні (супутникові системи, орбітальні станції), авіаційні (безпілотні літальні апарати, гелікоптери) та неконтактні типи даних (гідроакустичні знімки дна, сейсмо);

- комп'ютерні методи обробки супутникових даних, які використовують обробку даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ);

- геоінформаційна система (ГІС) – комп'ютерна технологія, що дозволяє поєднати картографічне зображення території з різноманітними статистичними даними).

На даний час, існують наступні методи ДЗЗ, які є діючими або перебувають на стадіях розробки, для картографування затоплених територій з використанням супутникових радіолокаційних даних:

- метод порогової сегментації із застосуванням цифрової моделі рельєфу (ЦМР) з супутника RADARSAT-1. Для цього виконуються 4 кроки: Фільтрація даних методом Фроста, сегментація зображення, моделювання радіолокаційного зображення та геоприв'язка зображення [15];

- статистичний метод, що базується на оцінці визначення границь між гомогенними регіонами [15];

- метод визначення границь зображень для сегментації і картографування повеней Використовується для розділення зображення на класи “суша” та “вода” [15];

- часовий ряд з 21 радіолокаційного зображення – це метод, що базується на обчисленні наступних параметрів: класифікації зображення на різні типи рослинного покриву та оцінюванні динаміки змін паводка чи повені [15];

- нейромережевий метод картографування повеней на основі супутникових зображень. Аналіз отриманих даних здійснюється трьома супутниками: ERS-2, ENVISAT, RADARSAT-1.

Аналіз існуючих методів контролю і прогнозування паводкових вод містить ряд недоліків, зокрема:

- не проводиться прогнозування рівня паводкових вод і врахування лише одного чи двох метеорологічних показників [8, 12];

- для [9] відсутній взаємозв'язок атмосферних опадів з іншими кліматологічними показниками;

- не врахування геофізичних даних про водозбір [10];

- надає лише інформацію про безпечний спосіб маршрутизації під час паводкових вод [11].

Щодо методів екологічного моніторингу, то існують такі недоліки: значення кроку моделювання необхідно вибирати вручну та необхідність використання декількох зображень.

З врахування вище сказаних недоліків, запропонована методика прогнозування рівня паводкових вод на основі статистичних даних з використанням апроксимуючих кривих, який дозволяє спрогнозувати рівень

паводкових вод, беручи до уваги зміну метеорологічних даних через кожну годину, а також спостерігати при цьому зміну рівня води рік у період природних катаклізмів (паводків, повеней).

3. Математичний апарат методики прогнозування рівня паводкових вод

З метою побудови апроксимуючих кривих, які будуть краще апроксимувати статистичні (експериментальні) дані і описувати процес паводкових вод, запропоновано використовувати функцію виду:

$$y_i = \frac{c_j}{b_j \cdot (t - t_0)^2 + 1}, j=1, \dots, 2, \tag{2}$$

яка дозволяє розбити статистичні (експериментальні) дані на дві частини та проводити апроксимацію за даною формулою для кожної з цих частин зокрема. У формулі (2.32) c_j, b_j – коефіцієнти, що знаходяться за методом найменших квадратів до моменту $t = t_0$, який відповідає піку паводку ($j = 1$) та після цього пікового моменту ($j = 2$).

Це дозволяє розширити клас явищ, які описуються залежністю (2), оскільки у випадку прийняття єдиних значень c та b для всіх моментів часу функція (2) є парною, а це суттєво обмежує клас явищ, що розглядаються лише випадком симетричних процесів.

У даному випадку виникає лише єдина проблема – функція (2) при різних b_j та c_j може бути розривною, проте це не обмежує її можливостей при описанні процесів у випадку невеликої різниці значень y_i в точці t_0 .

Пропонується наступна схема обробки даних про поведінку паводку за відомими y_i, t_i , де $i = 1, 2, \dots, N$ – число спостережень, яких у період інтенсивного паводку може бути досить значне через те, що контроль за рівнем паводкової води y_i здійснюється регулярно t_i):

1) за відомими значеннями (y_i, t_i) і за запропонованою методикою будується залежність $y = t^n \cdot e^{-at}$. Знаходиться точка максимуму цієї функції:

$$\begin{cases} y' = n \cdot t^{n-1} \cdot e^{-at} - a \cdot t^n \cdot e^{-at} \\ t^{n-1} \cdot e^{-at} \cdot [n - a \cdot t] = 0 \\ t_0 = \frac{n}{a} \end{cases}, \tag{3}$$

$$\begin{cases} n = n(x_1, x_2, \dots, x_k, t); \\ a = a(x_1, x_2, \dots, x_k, t), \end{cases} \tag{4}$$

де коефіцієнти n та a , які можуть бути функціями виду (3) і величини x_k – проникність ґрунту, вологість повітря, зволоженість водозаборів, особливості рельєфу та метеорологічні дані, тощо, а змінна t – час;

2) за знайденим значенням $t_0 = \frac{n}{a}$ знаходяться коефіцієнти c_1, c_2, b_1, b_2 у формулах:

$$\begin{cases} y_1 = \frac{c_1}{b_1 \cdot (t - t_0)^2 + 1} \\ y_2 = \frac{c_2}{b_2 \cdot (t - t_0)^2 + 1} \end{cases}. \tag{5}$$

Перетворення приводяться лише для $j = 1, j = 2$:

$$\begin{cases} y_1 \cdot b_1 \cdot (t - t_0)^2 + y_1 = c_1 \\ y_1 = -b_1 \cdot y_1 \cdot (t - t_0)^2 + c_1 \end{cases}, \tag{6}$$

$$\begin{cases} \tilde{y} = y \\ \tilde{t} = y_1 \cdot (t - t_0)^2 \\ \tilde{k} = -b_1 \\ \tilde{l} = c_1 \end{cases}, \tag{7}$$

де $\tilde{y} = \frac{\ln y}{t}; \tilde{t} = \frac{\ln t}{t}; \tilde{k} = n; \tilde{l} = -a$ і для знаходження \tilde{k} і \tilde{l} використовуються співвідношення (8):

$$\begin{aligned} \tilde{k} &= \frac{N \sum \tilde{y}_i \tilde{t}_i - \sum \tilde{y}_i \sum \tilde{t}_i}{N \sum \tilde{t}_i^2 - (\sum \tilde{t}_i)^2}, \\ \tilde{l} &= \frac{1}{N} (\sum y_i - \tilde{k} \sum \tilde{t}_i), \end{aligned} \tag{8}$$

і здійснюючи обернені перетворення, знаходимо b_1 та c_1 .

Результати проведених розрахунків засвідчують ріст точності апроксимації. У тому випадку, коли точність наближення продовжує залишатись невисокою, пропонується використання апроксимуючих функцій виду:

$$y = \frac{c}{b \cdot (t - t_0)^k + 1}, \tag{9}$$

де $k = 0,8 \div 2,6$.

Коефіцієнт k визначає плавність апроксимуючої кривої.

4. Обробка статистичних даних про розвиток паводку, які одержані з метеорологічних станцій басейну ріки Прут

Побудова апроксимуючих кривих згідно вище описаної методики, яка здійснювалася на основі вихідних даних рівень ріки Прут, м. Яремча, м. Коломия та м. Чернівці з 24.07.08/03 по 25.07.08/15 [16].

В результаті статистичних даних (рис. 1) під час паводку ріки Прут (метеорологічна станція Яремча, Україна) встановлено, що протягом 24 год випало 135 мм атмосферних опадів; дефіцит вологості повітря в середньому при цьому становив 0,48 гПа; середня швидкість вітру – 1 м/с.

Рівень ріки протягом доби (рис. 1, передпаводковий рівень води становив $y_p = 300$ см) піднявся на 240 см (Δy) і досяг максимального підняття 540 см (y_{max}). Протягом 12 год. відбувся спад рівня паводкових вод на 180 см (Δy_1) і кількість атмосферних опадів становила 14 мм (рис. 1).

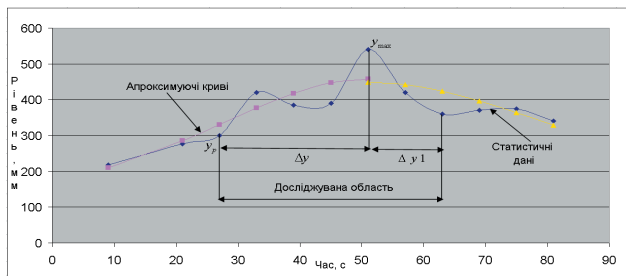


Рис. 1. Побудова апроксимуючої кривої для ріки Прут (Яремча)

Аналогічна побудова апроксимуючих кривих та аналіз статистичних даних проводився для ріки Прут (м. Коломия та м. Чернівці, Україна).

Метеорологічні дані (протягом 24 год.) під час паводкового процесу на ріці Прут (м. Коломия, $y_p = 348$ (рис. 2)):

- атмосферні опади – 120 мм (відсутні дані за 12 год.);
- середнє значення дефіциту вологості повітря – 0,92 гПа;
- середня швидкість вітру – 2,6 м/с;
- максимальне підняття рівня води під час паводку становило 734 см;
- підняття рівня води ріки – 386 см.

Протягом наступних 12 год. відбувся спад рівня паводкових вод на $\Delta u_1 = 266$ см і кількість атмосферних опадів – 18 мм.

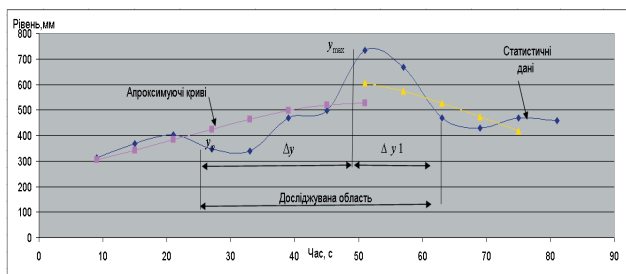


Рис. 2. Побудова апроксимуючої кривої для ріки Прут (Коломия)

З метою детальнішого аналізу статистичних даних для ріки Прут, м. Чернівці обрано часовий проміжок 42 год (рис. 3):

- передпаводковий рівень води – 392 см;
- атмосферні опади – 53,3 мм;
- середнє значення дефіциту вологості повітря – 1,82 гПа;
- середня швидкість вітру – 2,05 м/с;
- максимальне підняття рівня води під час паводку – 850 см;
- підняття рівня води ріки – 458 см.

Вибір даного часового проміжку для ріки Прут, м. Чернівці обумовлений також 2 піками підйому рівня паводкових вод при 840 см та 850 см.

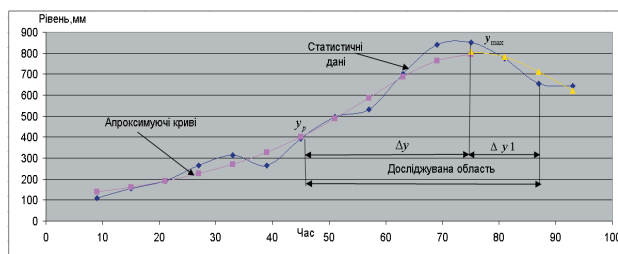


Рис. 3. Побудова апроксимуючої кривої для ріки Прут (Чернівці)

Спад рівня паводкових вод протягом наступних 12 год. відбувся на $\Delta u_1 = 195$ см і кількість атмосферних опадів – 31,3 мм.

5. Висновки

Аналізуючи представлену інформацію встановлено, що кількість атмосферних опадів 20 мм/добу є критичною для формування паводку, що підтверджує [17], а також сформувані зробити наступні висновки:

- якщо кількість атмосферних опадів кожні шість годин приблизно 30 мм, то рівень води в цей час підніметься на 60 см, що дає можливість зробити прогноз через кожну годину (5 мм/год – 10 см підняття рівня паводкових вод);
- швидкість вітру в період паводкових вод не є нижчою 1 м/с;
- середнє значення дефіциту вологості повітря через 6 год в межах 0,5 до 1,8 гПа.

Апроксимуючі криві дозволяють спрогнозувати формування паводкових вод, проконтролювати рівень їх зміни і встановити, при яких метеорологічних характеристиках відбувається процес їх формування, а також визначати можливу тривалість паводкових вод в певній місцевості. Розроблено математичний апарат методики для побудови кривої зміни рівня паводкових вод, яка відображає зміну рівня паводкових вод у часі.

Аналізуючи представлену інформацію встановлено, що кількість атмосферних опадів 20 мм/добу є критичною для формування паводку, що підтверджує [17–18], а також сформувані зробити наступні висновки:

- якщо кількість атмосферних опадів кожні шість годин приблизно 30 мм, то рівень води в цей час підніметься на 60 см, що дає можливість зробити прогноз через кожну годину (5 мм/год – 10 см підняття рівня паводкових вод);
- швидкість вітру в період паводкових вод не є нижчою 1 м/с;
- середнє значення дефіциту вологості повітря через 6 год в межах 0,5 до 1,8 гПа.

Апроксимуючі криві дозволяють спрогнозувати формування паводкових вод, проконтролювати рівень їх зміни і встановити, при яких метеорологічних характеристиках відбувається процес їх формування, а також визначати можливу тривалість паводкових вод в певній місцевості.

Література

1. Библюк Н. І. Небезпечні стихійні явища в Карпатах: причини виникнення та шляхи їх мінімізації. [Текст] : зб. наук. праць / Н. І. Библюк, І. П. Ковальчук, О. С. Мачуга // Лісівничої академії наук України / НЛТУ України, Лісівнича академія наук

- України. – 2009. – Вип. 6. – С. 105–119. – Режим доступу : http://www.nbuv.gov.ua/ujrn/Chem_biol/nplanu/2008_6/LAN_6_Vybluk.pdf.
2. Паводок: в трех областях Украины затоплены дороги [Електронний ресурс] / Корреспондент.net. Офіційний сайт. – Режим доступу: <http://korrespondent.net/ukraine/events/1059085>.
 3. На Западе Украины начинается паводок. [Електронний ресурс] / Корреспондент.net. Офіційний сайт. – Режим доступу: <http://korrespondent.net/ukraine/events/1195609-na-zapade-ukrainy-nachinaetsya-pavodok>.
 4. В Китае сильные паводки отрезали от внешнего мира тысячи человек [Електронний ресурс] / Newsland. Офіційний сайт. – Режим доступу: <http://newsland.com/news/detail/id/260308/>.
 5. Сильное наводнение в китайской провинции Хунань [Електронний ресурс] / Euronews. Офіційний сайт. – Режим доступу: <http://ru.euronews.com/2013/08/25/china-floods-reach-hunan-province/>.
 6. Різдваний паводок: Європа “пливе” у новий рік [Електронний ресурс] / Euronews. Офіційний сайт. – Режим доступу: <http://ua.euronews.com/2013/12/27/bad-weather-puts-a-damper-on-christmas-in-south-of-uk/>.
 7. Повінь в Німеччині може “влетіти” у € 12 млрд. [Електронний ресурс] / ТСН вражає. Офіційний сайт. – Режим доступу: <https://tsn.ua/svit/povin-v-nimechchini-mozhe-vletiti-u-12-milyardiv-yevro-298046.html>.
 8. WO2013063699, G08B 31/00 (2006.01), G01M 99/00 (2011.01), G06Q 40/08 (2012.01). System and method for predication flooding [Text] / Moss Ian; Tremblay Robert, Insurance bureau of Canada. – PCT/CA2012/050772; international filing 31.10.2012; publication 10.05.13.
 9. JP2002107462, G01W 1/10. Rainfall food forecasting system [Text] / Sadamichi Shigemi; Foundation of river & basin integrated communications Japan. –2000296115; application Date 31.10.2000; publication A 10.04.2002.
 10. CN102289570, G06F 19/00. Flood forecast method based on rainfall-runoff-flood routing calculation [Text] / Ran Qihua, Wang Zhenyu, He Zhiguo, Zhejiang University. – 102289570; application Date 23.07.2011; publication A 21.12.2011.
 11. US 2013/0116920 A1, G01 C 21/00 (2006.01). System, method and program product for flood aware travel routing [Text] / Victor Fernandes Cavalcante, Bruno Da Costa Flach, Maira Athanzio de Cerqueira Gatti, Ricardo Guimaraes Herrmann, Kiran Mantripragada, Marco Aurelio Stelmar Netto, Lucas Correia Villa Real, Paula Aida Sesini, Cleidson Ronald Botelho De Souza, Bianca Zadrozny, International Business Machines Corporation, Armonk, NY (US). – 13/290,334; application Date 07.11.2011; publication 03.05.2013.
 12. Пат. 2480825 Российская Федерация, G06N 3/02. Способ прогнозирования времени наступления и уровня паводков [Текст] / Варшанина Т. П., Плисенко О. А., Коробков В. Н.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Адыгейский государственный университет” (ФГБОУ ВПО “АГУ”). – № 2010140576/08; заявл. 04.10.2010; опубл. 10.04.2012, Бюл. № 10.
 13. Matei, Alexandra An ANN Based Flood Prediction System / Alexandra Matei // BULETINUL Universităţii Petrol. – Gaze din Ploieşti. – 2009. – Vol. LXI, № 3. – P. 353 – 358.
 14. Ward, R. A Geographical Perspective [Text] / R. C. Ward, C. Floods. – London etc – Macmillan, 1978. – 244 p.
 15. Скакун, С. В. Нейромережевий метод картографування повеней на основі супутникових зображень [Текст] / С. В. Скакун // Наукові праці ДонНТУ серія “Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка”. – 2001. – Вип. 10 (153). – С. 52–58.
 16. Гребінь, В. В. Оцінка можливості оперативного прогнозування дощових паводків на річках басейнів Прута та Сірету [Текст] / В. В. Гребінь, О. І. Лук’янець, І. І. Ткачук // Український гідрологічний журнал. – 2012. – № 10. – С. 164–175.
 17. Режим формування історичних паводків в українських Карпатах. TextReferat [Електронний ресурс] / Режим доступу: <http://ua.textreferat.com/referat-4484.html>.
 18. Адаменко, О. М. Про причини та можливості попередження й зниження катастрофічних наслідків регіональних паводків у західному регіоні України [Текст] / О. М. Адаменко. – Природа Західного Полісся та прилеглих територій, 2009. – С. 9–16.