

УДК 528.92

ГЕОІНФОРМАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РІВНІВ ВОДИ р. СТИР В ПАВОДКОВИЙ ПЕРІОД У МЕЖАХ ТЕРИТОРІЇ м. ЛУЦЬКА

В. Волошин, О. Мельник

Східноєвропейський національний університет імені Лесі Українки

Ю. Мельник, О. Верешко

Луцький національний технічний університет

Ключові слова: геоінформаційне моделювання, апроксимація, цифрова модель рельєфу, рівень води, паводковий процес.

Постановка проблеми

Паводки і повені є характерними явищами для всіх річок України, водозборам яких притаманна нерівномірність випадання атмосферних опадів. Сила паводків великою мірою залежить від суми, інтенсивності та тривалості атмосферних опадів або запасу води у сніговому покриві та інтенсивності утворення талих вод [1].

Паводок – фаза гідрологічного режиму річки, яка характеризується швидким, порівняно короткотривалим підвищенням рівня води в річищі під час сильних злив, тривалих дощів або інтенсивного танення снігу в період відлиги, на яке накладаються дощі. Паводки в Україні є звичайним природним явищем, що повторюється періодично. Однак у деяких випадках воно набуває катастрофічних ознак, спричиняє руйнування дамб та будинків, загибель людей, значні матеріальні втрати.

У середньому за рік на річках Волині відбуваються один–три паводки із виходом за межі заплави та повені. Частота формування паводків у багаторічному аспекті підпорядкована певним закономірностям, які проявляються у чергуванні періодів підвищеної та низької водності, що зумовлені глобальною атмосферою циркуляцією.

Територія басейну р. Стир характеризується рівнинним рельєфом, що утруднює швидке проходження паводків і призводить до затоплення великих територій, в середньому один раз на два–три роки.

Господарська діяльність, яка провадиться з порушенням екологічних норм, значно зменшила пропускну можливість річки Стир і цілої низки її приток, що збільшило рівні води та час проходження паводків.

Основними причинами виникнення весняного паводка як природного стихійного явища (так само, як і осіннього) є природні (гідрометеорологічні) фактори, прояв яких підсилений антропогенним навантаженням території. Тобто катастрофічні наслідки, певною мірою, зумовлені активною господарською діяльністю упродовж останніх десятиліть. Посиленню негативних наслідків, їх катастрофічному прояву сприяє також розташування будов у зоні постійного затоплення, інтенсифікація схилового стоку.

Тож сьогодні назріла гостра потреба у комплексному плануванні та здійсненні невідкладних проти-паводкових заходів і впорядкуванні господарської діяльності на водозборах у регіонах, що найбільше зазнають руйнівної дії повеней і паводків.

Зв'язок із важливими науковими і практичними завданнями

Починаючи з 1995 р. науковці Східноєвропейського національного університету імені Лесі Українки та Луцького національного технічного університету виконують комплексні регіональні моніторингові дослідження.

Робота виконана у межах таких програм: “Комплексна регіональна програма захисту населення і територій від надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру у Волинській області на 2016–2020 роки”; Регіональна екологічна програма “Екологія 2016–2020”; Регіональна програма оцінки стану та розчищення русел основних річок Волині; Регіональна програма моніторингу довкілля Волинської області; Регіональна екологічна програма “Екологія-2015 та прогноз до 2020 року”.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, які стосуються вирішення цієї проблеми

Питання дослідження, прогнозування та моделювання паводків не втрачає актуальності для вітчизняних та закордонних вчених. Моніторинг повеневих процесів із застосуванням дистанційних методів, їх прогнозування та геоінформаційне моделювання розглянуто у роботах [2, 3], а у поєднанні із математичним прогнозуванням у працях [4, 5]. Питання моделювання із застосуванням дискретних рядів Фур'є досліджено у статтях, серед яких [6, 7].

Питання практичного застосування геоінформаційних систем загалом та конкретно пакета QGIS висвітлено в роботах [8, 9, 10].

Питаннями математичного моделювання паводкового процесу на р. Стир присвячена робота [11], однак Геоінформаційне прогнозування затоплення площ території міста Луцька не розглядалось, тому пропонується дослідження своєчасне й актуальне.

Виклад основного матеріалу проблеми

Частота формування паводків у багаторічному аспекті підпорядкована певним закономірностям, які проявляються у чергуванні періодів підвищеної та

низької водності, що зумовлені глобальною атмосферою циркуляцією.

За висновками науковців Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту, не виключено повторення в наступні роки високих паводків на річках усього західного регіону України, що потрібно враховувати під час виконання заходів із захисту населення від негативних наслідків вод.

Територія Волинської області характеризується рівнинним рельєфом, що утруднює швидке проходження паводків і призводить до затоплення великих територій, в середньому один раз на два-три роки.

Господарська діяльність, яка провадиться з порушенням екологічних норм, істотно зменшила пропускну можливість річки Стир і цілої низки її приток, що збільшило рівні води та час проходження паводків.

Основними причинами виникнення весняного паводка як природного стихійного явища (так само, як і осіннього) є природні (гідрометеорологічні) фактори, прояв яких підсилений антропогенним навантаженням території. Катастрофічні наслідки, певною мірою, спричинені активною господарською діяльністю упродовж останніх десятиліть. Посиленню негативних наслідків, їх катастрофічному прояву сприяє також розташування будов у зоні постійного затоплення, інтенсифікація схилового стоку.

На основі статистичних даних Волинського обласного центру з гідрометеорології за останні шість

років про рівні води на р. Стир, використовуючи декадні значення рівнів води (табл. 1), ми провели математичне моделювання коливання рівнів води у період у межах території м. Луцька. Гідрологічний пост вимірювання рівнів води р. Стир на території м. Луцька розташований на вул. Шевченка та має абсолютну відмітку рельєфу 172,87 м.

Аналізуючи статистичні дані, можна стверджувати, що щорічно на території м. Луцька відбуваються один-два паводки. У 2011 р. паводок спостерігався у лютому, коли рівень води піднявся до абсолютної відмітки 177,85 м, та у серпні під час зливових дощів, коли рівень води зріс з 2,74 м до 3,84 м. У 2012 р. весняний паводок був у березні з максимальним рівнем води 177,05 м, а під час вересневих дощів рівень води зріс 3,13 м до 3,77 м. У 2013 р. 15 квітня спостерігався рекордний весняний паводок, коли рівень води досяг відмітки 179,00 м, а під час осінніх вересневих та жовтневих дощів рівень води зріс із 2,69 м до 3,48 м. У 2014 р. паводки зафіксовано у лютому та червні, коли протягом трьох декад рівень води піднімався з відмітки 2,89 м до 3,84 м та 2,77 м до 3,78 м. У 2015 р. у паводковий період у травні рівень води піднявся з відмітки 175,59 м до 176,27 м. У 2016 р. на території м. Луцька спостерігався осінній паводок, коли у другій декаді листопада рівень води почав підніматись з відмітки 2,81 м до відмітки 3,58 м 18 грудня.

Колівання рівнів води у р. Стир за останні шість років подано на рис. 1.

Таблиця 1

Середньодекадні рівні води р. Стир у межах території м. Луцька за 2011–2016 рр.

Рік	Декада	Рівні води за місяцями, см											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
2011	I	419,40	491,10	444,80	391,10	336,90	260,00	289,40	375,70	330,50	269,80	264,60	265,50
	II	458,10	485,00	394,90	382,50	333,90	287,60	311,10	379,00	279,70	266,90	261,80	272,10
	III	481,45	483,75	428,91	358,00	304,82	271,40	302,82	351,64	271,40	270,82	263,60	285,18
2012	I	282,20	297,90	398,70	349,40	327,40	291,50	325,60	291,20	324,00	349,90	334,70	286,60
	II	271,10	293,60	365,40	359,20	329,30	352,30	300,40	313,70	317,30	339,70	333,30	309,70
	III	291,91	343,00	342,45	351,20	298,55	356,20	300,55	337,00	352,60	339,73	310,00	341,82
2013	I	349,70	421,70	443,80	524,20	533,50	451,90	409,30	349,20	276,60	331,50	326,60	305,80
	II	380,70	441,60	440,80	603,50	492,10	464,90	364,10	280,90	294,30	319,50	305,30	294,30
	III	375,36	453,63	484,82	586,80	443,91	457,50	364,36	277,36	330,90	327,55	307,40	294,18
2014	I	304,70	346,70	365,50	285,30	267,50	352,10	289,00	261,30	270,90	267,10	259,20	247,60
	II	300,90	365,70	331,00	286,00	283,30	360,20	295,60	262,40	265,80	273,00	261,70	243,20
	III	351,91	379,63	325,82	285,30	295,18	365,50	271,55	263,91	272,60	256,55	249,90	266,00
2015	I	264,80	279,70	272,10	282,30	248,20	306,40	244,30	245,40	241,50	257,40	246,00	253,40
	II	297,90	258,40	277,20	275,10	255,40	260,30	235,80	235,90	242,20	257,80	244,90	252,90
	III	291,55	260,38	275,09	254,30	294,18	250,70	244,00	241,64	240,30	264,18	254,20	252,82
2016	I	270,40	298,70	302,80	266,40	256,80	254,60	273,50	275,30	247,30	245,00	292,00	327,00
	II	275,70	289,50	291,30	272,10	264,00	259,30	280,80	275,60	240,10	255,80	291,30	343,00
	III	280,55	298,00	272,64	278,90	268,55	269,00	288,91	261,73	237,80	259,45	326,50	328,55

Запропонована математична модель рівнів води на р. Стир у межах території м. Луцька основана на побудові часткового ряду Фур'є [6, 7] за дискретними значеннями середньодадних значень рівнів води у 2011–2016 рр.

Як показали модельні обчислення, характер коливання рівнів води за вказаний період апроксимується поліноміальною трендовою складовою виду:

$$H(t) = \sum_{i=0}^k a_i t^i, \quad (1)$$

де $H(t)$ – значення рівня води р. Стир; a_i – коефіцієнти поліноміального тренду; t – змінна часу.

У результаті опрацювання подекадних значень коливання рівнів води ми дійшли висновку, що трендову складову коливання рівнів води р. Стир у досліджуваній період достатньо подавати у вигляді полінома третього степеня. Виконавши математичне оброблення, ми отримали трендову криву виду:

$$H(t) = 0.00005t^3 - 0.01689t^2 + 1.06083t + 340.98571. \quad (2)$$

Для детальнішого вивчення коливання рівнів води подамо відхилення результатів спостережень від значень, які одержали трендовою кривою (2), у вигляді кінцевого ряду Фур'є:

$$\begin{aligned} \bar{h}(t) &= a_0 + \sum_{k=1}^{30} [a_k \cos(kt) + b_k \sin(kt)], \\ a_j &= \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n (h_{i_{\Phi}} - h_{i_T}) \cos(jt), \\ b_j &= \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n (h_{i_{\Phi}} - h_{i_T}) \sin(jt), \\ a_0 &= \frac{\sum_{i=1}^n (h_{i_{\Phi}} - h_{i_T})}{n}, \end{aligned} \quad (3)$$

де $h_{i_{\Phi}}$ – фактичне значення рівня води; h_{i_T} – значення рівня води, отримане з трендової складової апроксимуючої функції за (2).

З урахуванням викладеного вище математична модель коливання значень рівнів води в р. Стир з 2011 до 2016 рр. матиме вигляд:

$$h(t) = H(t) + a_0 + \sum_{k=1}^{30} [a_k \cos(kt) + b_k \sin(kt)]. \quad (4)$$

Запропоновану математичну модель ми використали для короткострокового прогнозування паводкових процесів р. Стир на території м. Луцька. Графічну інтерпретацію результатів моделювання і прогнозування на початок 2017 р. подано на рис. 2. Як видно з рис. 2, прогнозується весняний паводок у лютому–березні з максимальним рівнем води 4,20 см, що відповідає абсолютній відмітці 177 м.

Подальші дослідження були спрямовані на визначення територій підтоплення у межах м. Луцька.

Для побудови рельєфу м. Луцька використано файли матриць висот SRTM v.4, отримані з ресурсів <http://mapgroup.com.ua> [12] та Геологічного товариства

Сполучених Штатів Америки [13]. Оброблення даних та візуалізація результатів здійснювались за допомогою вільної географічної інформаційної системи з відкритим кодом QGIS [14] в актуальній на момент написання статті версії з довготривалою підтримкою 2.14.11 (LTR). Це програмне забезпечення розповсюджується за ліцензією GNU General Public License [15].

SRTM (Shuttle Radar topographic mission) [16] – міжнародна місія з отримання даних цифрової моделі рельєфу (ЦМР) території Землі. Знімання місцевості проводилося в лютому 2000 р. з борту космічного корабля багаторазового використання “Шаттл” за допомогою радарної інтерферометричної камери і двох радіолокаційних сенсорів SIR-C і X-SAR, встановлених на борту корабля. В ході цих робіт знято близько 12 терабайт радіолокаційних даних, після оброблення яких отримали матрицю висот, що охоплює територію суші від 60° пн. ш. до 54° пд. ш. і деякі ділянки моря. Дані SRTM існують у декількох версіях: попередні (версія 1, 2003 р.) і остаточна (версія 2, лютий 2005 р.). Остаточна версія пройшла додаткове оброблення: виділення берегових ліній і водних об'єктів, фільтрацію помилкових значень. Дані SRTM поширюються у декількох варіантах – сітка з розміром комірки 1"×1" і 3"×3" (кутові секунди). Дані SRTM з розміром комірки 1"×1" (тобто з просторовим розрізненням 30 м) точніші, але, на жаль, доступні лише на територію США. На решту поверхні Землі загальнодоступними є дані цієї SRTM з розміром комірки 3"×3" і заявленою точністю не нижче за 16 м.

Точність матриці SRTM відповідає критерію LE90 (величини, які з імовірністю 90 % не перевищують відхилення висоти точки від її істинного значення). Значення висот за точністю приблизно відповідають висотам, отриманим з топографічної карти масштабу 1:100000. З урахуванням систематичної помилки можливе підвищення точності висот SRTM. Матрицю висот SRTM можна використовувати для створення ортофотопланів масштабу 1:25 000 і дрібніше на райони з рівнинним і горбистим рельєфом. Оцінювання точності матриці висот SRTM докладно описано в роботах [17, 18].

На першому етапі оброблення даних було векторизовано межу м. Луцька згідно з Генеральним планом міста, затвердженим Рішенням Луцької міської ради № 42/1 від 24.06.2009 р. [19]. Для моделювання паводкових процесів векторизовано русла річок Стир, Сапалаївка та Кічкарівка за зображеннями, отриманими із сервісу Google Maps [20] станом на 10.04.2014 р.

Для зменшення часу оброблення зображення файлів висот були обрізані по межі території міста Луцька. За даними SRTM було виділено горизонталі на досліджувану територію з кроком 5 м, графічно рельєф відображений з використанням одноканальної псевдокольорової гами. Для наочнішого відображення зон підтоплення використано знімок території м. Луцька із сервісу Google Maps [20], використаний як фон отриманої карти (рис. 3).

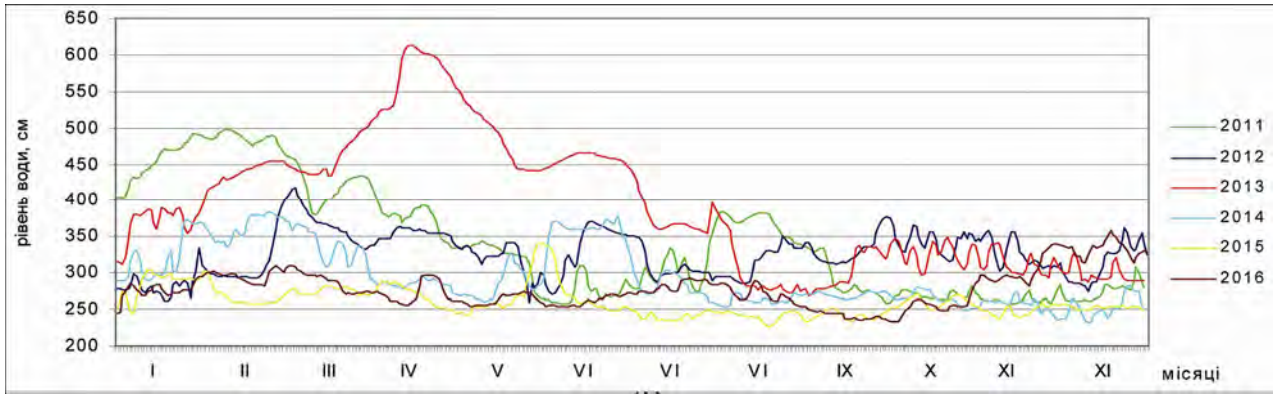


Рис. 1. Динаміка зміни рівнів води р. Стир у межах території м. Луцька за 2011–2016 рр.

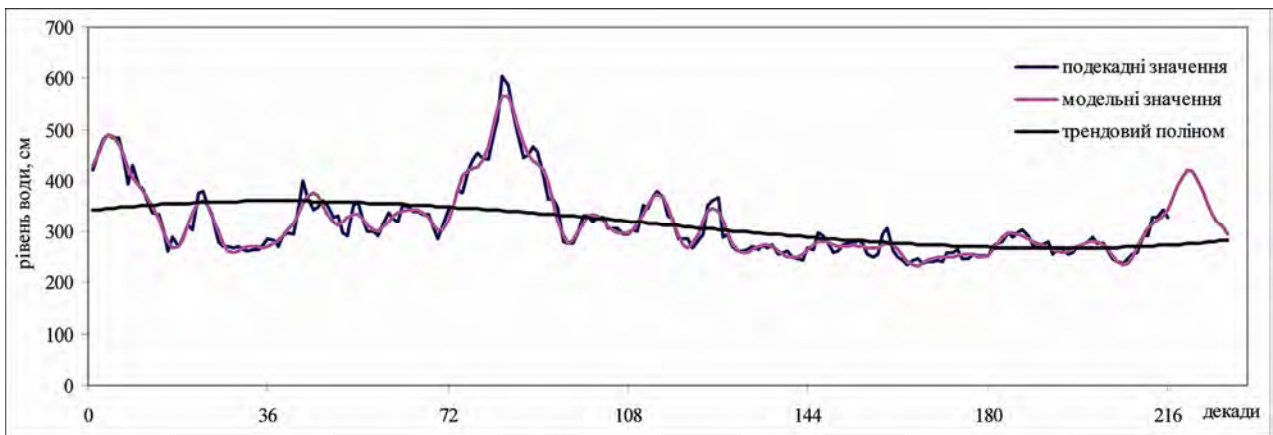


Рис. 2. Апроксимація подекадних рівнів води р. Стир на посту спостережень м. Луцьк за математичною моделлю

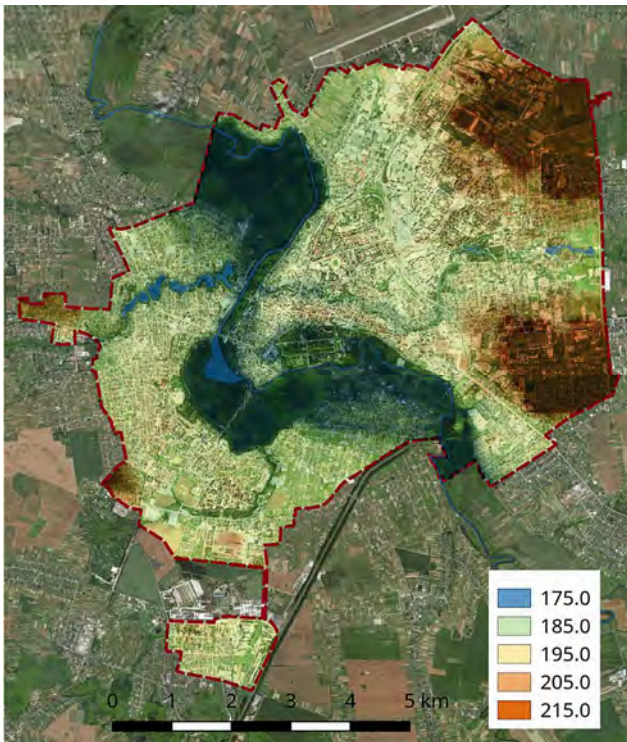


Рис. 3. Вихідні дані території м. Луцька, отримані в геоінформаційній системі QGIS

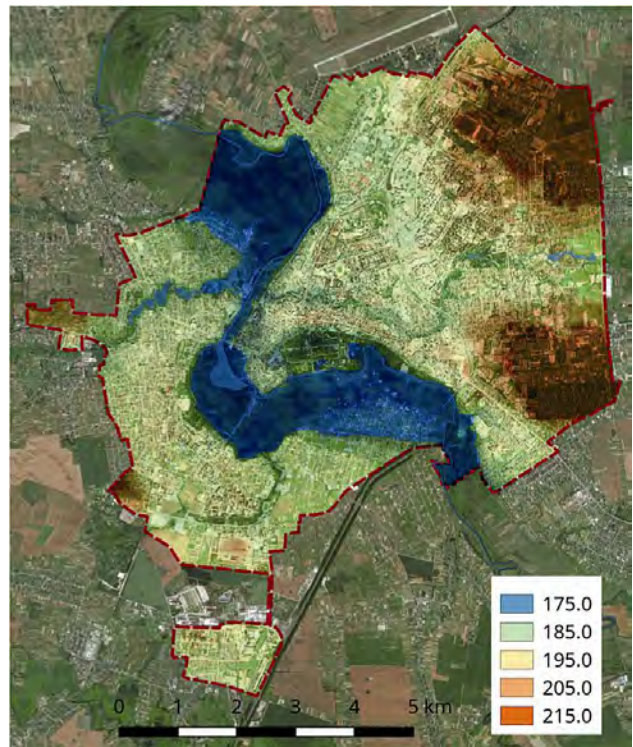


Рис. 4. Моделювання максимального рівня паводка на 15 квітня 2013 р. за рівня води у р. Стир 179,00 м

Надалі ми вирішили змоделювати рівень максимального паводкового рівня води в р. Стир станом на 15 квітня 2013 р., коли рівень води досяг відмітки 179,00 м. Графічно цю модель подано на рис. 4. На основі отриманих даних короткострокового прогнозування паводкового процесу в березні–квітні здійснено візуалізацію цих результатів за допомогою геоінформаційної системи QGIS. Графічно цю модель подано на рис. 5.

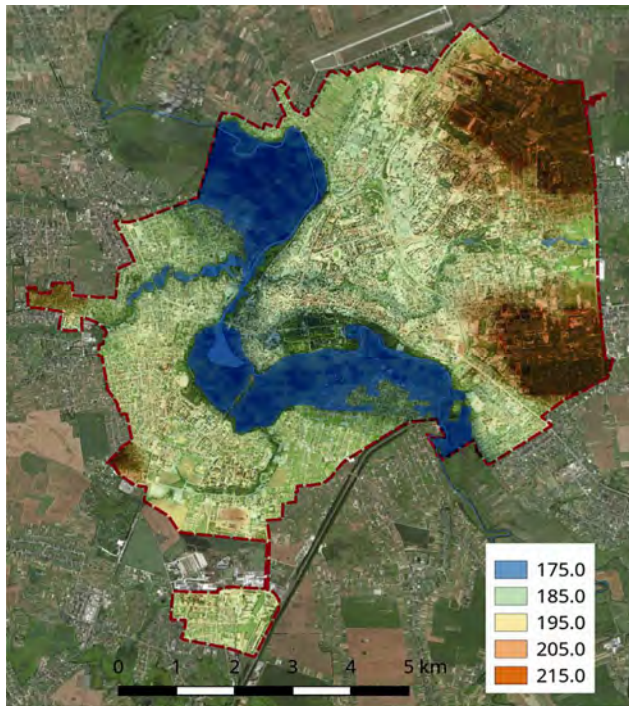


Рис. 5. Моделювання прогнозного рівня паводка станом на лютий–березень 2017 р. за рівня води у р. Стир 177,00 м

Висновки

На основі аналізу статистичних даних Волинського обласного центру з гідрометеорології за 2011–2016 рр. щодо рівнів води на р. Стир ми запропонували математичну модель, що оснований на побудові часткового ряду Фур'є за дискретними значеннями середньодекадних значень рівнів води. Цю математичну модель покладено в основу короткострокового прогнозування паводкових процесів, згідно з яким прогнозується весняний паводок у лютому–березні 2017 р. з максимальним рівнем води 4,20 см, що відповідає абсолютній відмітці 177 м. Результати математичного оброблення покладено в основу геоінформаційного моделювання територій підтоплення з використанням даних ДЗЗ, що є у вільному доступі. Використаний у статті набір статистичних та геопросторових даних має великий потенціал подальшого застосування для моделювання природних та техногенних процесів.

Література

1. Ковальчук І. Регіональний еколого-геоморфологічний аналіз / І. Ковальчук. – Львів: Інститут українознавства, 1997. – 440 с.
2. Дорожинський О. Фотограмметричний моніторинг повеневих процесів / О. Дорожинський, Р. Тукай // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Львів, 2011. – Вип. 2 (22). – С. 150–154.
3. Liu Y. B. Flood Modeling for Complex Terrain Using GIS and Remote Sensed Information / Y. B. Liu, F. De Smedt // Water Resources Management. – 2005. – No. 19. – P. 605–624.
4. Maat W. H. Simulating discharges and forecasting floods using a conceptual rainfall-runoff model for the Bolivian Mamoré basin / W. H. Maat // Master thesis of Civil Engineering and Management. University Of Twente. – March 2015. – 83 p.
5. Aronica G T. Flash floods and debris flow in the city area of Messina, north-east part of Sicily, Italy in October 2009: the case of the Giampileri catchment / G T. Aronica, G Brigand'i, N. Morey // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. – 12. 2012. – P. 1295–1309.
6. Волошин В. У. Моделювання вертикальних деформацій ґрунтової греблі водосховища Хмельницької АЕС / В. У. Волошин, О. В. Мельник // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Львів, 2012. – Вип. 23. – С. 132–136.
7. Мельник О. В. Апроксимація та прогнозування переміщень контрольних точок ґрунтових гребель із використанням рядів Фур'є / О. В. Мельник, Ю. А. Мельник // ScienceRise : междунар. научн. журнал. – Харків: НПП ЧП “Технологический Центр”, 2015. – Вип. 3(8). – С. 53–57.
8. Amir M.S.I.I. Watershed Delineation and Cross-section Extraction from DEM for Flood Modelling / M. S. I. I. Amir, M. M. K. Khan, M. G. Rasul, R. H. Sharma, F. Akram // 19th Australasian Fluid Mechanics Conference Melbourne, Australia 8–11 December 2014.
9. Knight P. J. Application of flood risk modelling in a web-based geospatial decision support tool for coastal adaptation to climate change / P. J. Knight, T. Prime, J. M. Brown, K. Morrissey, A. J. Plater // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. – 15. 2015. – P. 1457–1471.
10. Saikat Maiti. Development of hydrological modeling system for flood peak estimation using open source geospatial tools / Saikat Maiti, Praveen K. Thakur, Prasun K Gupta // OSGEO-India: FOSS4G 2015 – Second national conference “Open Source Geospatial Tools in Climate Change Research and Natural Resources Management” 8–10th June 2015.
11. Шостак А. Моделювання і прогнозування рівнів води в паводковий період у межах м. Луцька / А. В. Шостак, О. В. Верешко, В. У. Волошин // Містобудування та територіальне планування: зб. наук. праць. – К.: КНУБА, 2011. – Вип. 40, Ч. 2. – С. 562–568.
12. SRTM (ЦМР) Волинської області [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://mapgroup>.

- com.ua/services/32-dem-ukraine/87-srtm-tsmr-volynskoj-oblasti (дата звернення: 25.01.2017). – Назва з екрана.
13. U.S. Geological Survey [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://earthexplorer.usgs.gov> (дата звернення: 25.01.2017). – Назва з екрана.
 14. QGIS. Вільна географічна інформаційна система з відкритим кодом [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.qgis.org/uk/site/index.html> (дата звернення: 25.01.2017). – Назва з екрана.
 15. GNU General Public License [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.gnu.org/licenses/gpl.html> (дата звернення: 25.01.2017). – Назва з екрана.
 16. Shuttle Radar Topography Mission [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Shuttle_Radar_Topography_Mission (дата звернення: 25.01.2017). – Назва з екрана.
 17. Карионов Ю. И. Оценка точности матрицы высот SRTM / Ю. И. Карионов // Геопрофи. – 2010. – № 1. – ООО “Информационное агентство “ГРОМ”. – С. 48–51.
 18. Jarvis, Andy. Practical use of SRTM data in the tropics: Comparisons with digital elevation models generated from cartographic data / Andy Jarvis, Jorge Rubiano, Andy Nelson, Andrew Farrow and Mark Mulligan // Cali, CO : Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), 2004. – 32 p. (Working document no. 198).
 19. Рішення Луцької міської ради від 24.06.2009 № 42/1 Про затвердження генерального плану міста Луцька [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.lutskrada.gov.ua/pro-zatverdzhennya-generalnogo-planu-mista-lucka>. (дата звернення: 25.01.2017). – Назва з екрана.
 20. Google Maps [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.google.com/maps/> (дата звернення: 25.01.2017). – Назва з екрана.

**Геоінформаційне моделювання
рівнів води р. Стир
у паводковий період
у межах території м. Луцька**

В. Волошин, О. Мельник, Ю. Мельник, О. Верешко

Наведено результати досліджень зміни рівня води на р. Стир та зон підтоплення у межах м. Луцька. Запропоновано математичну модель короткострокового прогнозу рівня води у паводковий період на р. Стир та здійснено геоінформаційне моделювання території підтоплення з використанням даних ДЗЗ.

**Геоинформационное моделирование
уровней воды р. Стырь
в паводковый период
в пределах территории г. Луцка**

В. Волошин, А. Мельник,
Ю. Мельник, О. Верешко

Приведены результаты исследований изменения уровня воды на р. Стырь и зон подтопления в пределах г. Луцка. Предложена математическая модель краткосрочного прогноза уровня воды в паводковый период на р. Стырь и осуществлено геоинформационное моделирование территории подтопления с использованием данных ДЗЗ.

**Geoinformation modelling
of Styr river water levels in flood
period within the territory of Lutsk**

V. Voloshyn, O. Melnyk,
Y. Melnyk, O. Vereshko

Research results of changing water levels on the river Styr and areas of flooding within the city of Lutsk are presented in the article. The mathematical model of short-term forecasting of water level in flood period on the river Styr with implementation of geoinformation modeling of flooded areas using remote sensing data is proposed.

The ISPRS Foundation Travel Grants to participate in
ISPRS Hannover Workshop
Hannover, Germany
June 06 - 09, 2017
<https://www.ipi.uni-hannover.de/hrigi17.html>

GI Forum
SYMPOSIUM and EXHIBIT
Salzburg, July 4 - 7, 2017

GEO THE GEOSPATIAL EVENT
BUSINESS 2017 BUSINESS DESIGN CENTRE
LONDON • UK 23 - 24 MAY

