

## МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ГІС ARCGIS ТА МОДУЛЯ HEC-RAS

**Мета** роботи полягає у визначенні площ затоплення земель згідно обраної гідрологічної моделі складної ділянки р. Дністер у місці переходу від передгірської частини до рівнини зі складним меандруванням та значними зміщеннями річки. **Методи.** Опрацьовано метод дослідження затоплених земель внаслідок підняття води до певного рівня. Він включає: знімання з БПЛА; геодезичні та гідрологічні роботи; створення ЦМР та аналіз її точності; гідрологічне моделювання з використанням програмного пакету HEC-RAS; визначення площ затоплення. Для отримання цифрової моделі рельєфу, яка є основою для гідрологічного моделювання, був використаний БПЛА Trimble UX5 з камерою Sony NEX-5R. Точність визначення планових координат за ЦМР становить 6 см; висотні позначки залежно від базису стереопари та підстильної поверхні становлять 0,21 м. ЦМР створено за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення Pix4D. **Результати.** ЦМР створено за результатами знімання з БПЛА з середньою квадратичною похибкою 0,2 м. Методику гідрологічного моделювання реалізовано на частині річки Дністер зі складною конфігурацією русла. Визначено зони затоплення за різних рівнів підняття води. **Наукова новизна** полягає у розробці методики визначення затоплених територій на основі гідрологічного моделювання за допомогою модуля HEC-RAS для ділянки річки Дністер, яка характерна значною ерозією прибережних ґрунтів, складним меандруванням та переходом від передгірської частини до рівнинної. Такі умови вимагають точного визначення параметрів моделювання. Для отримання вхідних даних для моделювання затоплень виконано знімання з БПЛА з попереднім обґрунтуванням параметрів точності. **Практичне значення.** Гідрологічне моделювання виконують з метою передбачення наслідків матеріальних втрат внаслідок повеневих явищ, які трапляються в Прикарпатському регіоні. Своєчасне отримання інформації про ці процеси, стеження на гідрологічних постах за рівнем води, яка наповнює русла і заплаву, дозволяють через відповідні адміністративні структури здійснити оповіщення населення і прийняти заходи для зменшення втрат, які виникають внаслідок цих руйнівних явищ. Запропоноване дослідження спрямоване на отримання інформації про площі затоплення внаслідок різних рівнів підняття води в річці Дністер.

*Ключові слова:* гідрологічне моделювання; HEC-RAS; затоплення; гідрологія; безпілотні літальні апарати; цифрова модель рельєфу.

### Вступ

Природні паводки і повені належать до найчастіших та найбільш загрозливих стихійних лих, що відбуваються на земній кулі. Вони призводять до значних матеріальних і соціальних витрат. З метою мінімізації збитків, запобіганню трагічних наслідків цих явищ, оперативному інформуванню населення в останні десятиліття в світовій практиці опрацьовано методику моделювання затоплень та передбачення загроз руйнувань. Таке моделювання вимагає вивчення морфометричних особливостей русел рік та базується на використанні даних ДЗЗ та застосуванні спеціальних гідрологічних модулів.

Найбільші повені на річці Дністер, ділянка якої є предметом досліджень, відбулись в середині 1927, 1941 та 1955 р. Остання, викликана

тривалими дощами, охопила понад 70 тис. км<sup>2</sup>. Небувалим паводком, названим гідрологами історичним, був червневий паводок 1969 р. Тоді через дві доби 2 і 3 червня рівень води у верхів'ях рік піднявся на 1–3 м. Вночі з 7 на 8 червня почалися зливи і протягом одної 40-годинної зливи випало понад 300 мм опадів, тобто більше двомісячної норми, а подекуди кількість опадів навіть перевищила місячну норму втричі. Води в притоках Дністра і Пруту піднімалися із швидкістю від 30 до 90 см/год. Водомірні пристрої вийшли з ладу, ширина розливу води в окремих долинах ділянках досягала 8 км. З гір стікали стрімкі потоки, посилюючи руйнівну дію рік. На думку вчених-гідрологів це була найнебезпечніша з усіх повеней, яка спостерігалась у цьому регіоні. Цей паводок віднесли до тих, які повторюються раз у 100 років.

Паводок 2008 року стався влітку через грозові дощі. Його пік припав на 23–27 липня. Тоді постраждали території Карпатських гір, Прикарпаття і Закарпаття. Ще одним помітним паводком був паводок 14, 15, 16 травня 2014 р., коли рівень річки Дністер біля міста Старий Самбір піднявся на 4 м а там, де русло річки звужене – навіть до 5 м. Тоді відбулося затоплення акваторії [Ковальчук і Михнович, 2008].

В сьогоденнішніх реаліях через значні зміни природних умов, зокрема вирубки лісів, зміну клімату на Землі, паводки і повені створюють майже щорічні екологічні катаклізми, які супроводжуються значними економічними збитками та руйнівними процесами. Суть небезпеки полягає у виході на високі рівні води з річища на заплаву і затопленні будинків, угідь, комунікацій та інших господарських об'єктів, які часто зведені на заплаві річки. При цьому господарська діяльність у басейні Дністра в останні десятиліття підсилила вплив чинників, що призводить до частого виникнення і розвитку паводків, які завдають масштабних руйнувань.

Такі стихійні лиха не можна повністю відвернути, однак їхній вплив можна послабити, локалізувати і за своєчасного попередження звести до мінімуму матеріальні витрати. Цього можна досягти за допомогою оперативного моніторингу і прогнозування паводкової ситуації. Таким дієвим методом в сучасних реаліях є гідрологічне моделювання за ЦМР, яке проводять на підставі даних про тип русла та заплаву, гідрометрію рівнів води з означенням затоплених, які розраховані за вибраною гідрологічною моделлю та її реалізацією за допомогою спеціального програмного забезпечення.

В басейні Дністра у цьому плані паводки є найнебезпечнішим для його долини в межах Передкарпаття, а також долин його гірських приток при виході їх на долину. Гірська частина регіону характерна найбільшою інтенсивністю дощів, як і породжують паводки.

Автором дослідження [Карпець, 2014] розглянуто перспективи використання комп'ютерних технологій водорозподілу для отримання оцінки ситуації поверхневих водних об'єктів та водозбірних територій, для виявлення можливості виникнення надзвичайних ситуацій з метою своєчасної ліквідації їх наслідків. Крім того описано можливості протипаводкового

захисту, в основу яких покладено створення в гідрометслужбі сучасної автоматичної системи гідрометеорологічних спостережень, збору і отримання даних центром прогнозування в реальному часі з необхідною частотою. Це дозволяє швидко і ефективно оперувати даними, зберігати ці дані, мати швидкий і зручний доступ до них і на їх основі будувати високоякісні карти різних призначень.

Методологічний підхід щодо розподіленого гідрологічного моделювання за допомогою ГІС-засобів подано в публікації [Мельник, 2012]. Обговорюються загальні особливості гідрологічного моделювання в середовищі геоінформаційного програмного забезпечення. Розглядаються два типи розподілених моделей, які використовуються для відтворення гідрологічного компоненту середовища водозбірних басейнів. В загальному вигляді визначаються перспективи створення гідрологічної інформаційної системи.

У статті [Алабян та ін., 2015] описано основи побудови і практичну реалізацію систем оперативного прогнозування річкових повеней, що базуються на інтегрованому використанні сучасних розробок щодо інформаційних технологій і комплексного попереджувального моделювання.

Дослідження проведені зарубіжними вченими в університеті Теннессі [Sharkey, 2014] показують, що використання програмного комплексу HEC-RAS для моделювання ділянок річок з водосховищами на прикладі р. Теннессі, дає позитивні результати моделювання при використанні та створенні гідравлічної моделі цього водного об'єкта. Особливу увагу автор заострює на питаннях неточності моделі і нестійкості рішення задачі при мінімальних витратах води через гідротехнічні споруди, що, в свою чергу, здатне підвищити нестійкість рішення прямого розрахунку, але позитивно позначається в розрахунках обсягів води. Мета роботи автора полягає в прогнозуванні та оцінці небезпечних гідрологічних ситуацій, пов'язаних з високими і низькими витратами води у річковій мережі і безпосередньо для роботи гідровузлів, нарівні з питаннями стійкості рішення при даних гідрологічних сценаріях і ситуаціях.

Автор статті [Левашова, 1993] розглянула характеристики гідравлічних параметрів –

коефіцієнтів шорсткості – на основі узагальнених даних значної кількості річок (малих, середніх, великих), що протікають в різних фізико-географічних районах, з урахуванням таких чинників гідравлічних параметрів, як: глибина потоку, відносна ширина, амплітуда коливання рівня води, тип руслового процесу, характер ґрунтів і форма переміщення наносів, забрудненість русла рослинністю, деформації русла.

В роботі [Стародуб, 2015] розглянуто необхідність використання програмного забезпечення HEC-GeoRAS та HEC-RAS в проекті підвищення стану безпеки на територіях, які можуть бути затопленими внаслідок повеней. Наведено методологічні основи та алгоритм роботи даного програмного забезпечення, проведено порівняння отриманих даних затоплення з прогнозованими даними, отриманих на підставі затоплень попередніх років.

В [Gharbi, et al., 2016] автори виконували моделювання затоплень річки Меджерда в Тунісі за допомогою 1D та 2D гідравлічних моделей. Встановлено, що 1D-моделювання досить легко та швидко виконати, проте точність моделювання в межах заплави є нижчою, ніж в 2D моделях. Результати моделювання відкалібровано за даними повені 2003 р.

В [Khaleghi, et al., 2015] виконано гідрологічне моделювання в басейні річки Ліван Чай за допомогою software HEC-RAS. Встановлено збільшення збитків, які спричиняють повені, через зміну землекористування в заплаві. Для цього використовували ГІС-систему та дані дистанційного зондування.

В значній частині досліджень, які пов'язані з визначенням площ затоплень, моделювання виконують за одновимірною моделлю з використанням software HEC-RAS [Sandhyarekha & Shivapur A.V., 2017, Silva et al., 2014].

### **Мета**

Мета роботи полягає у визначенні площ затоплення земель згідно обраної гідрологічної моделі складної ділянки р. Дністер у місці переходу від передгірської частини до рівнини зі складним меандруванням та значними змінами річки [Burshtynska, et al., 2016, 2018].

### **Методи та результати робіт**

Опрацьовано метод дослідження затоплених земель внаслідок підняття води до певного рівня. Він включає: знімання з БПЛА; геодезичні та гідрологічні роботи; створення ЦМР та аналіз її точності; гідрологічне моделювання з використанням програмного пакету HEC-RAS; визначення площ затоплення. Для отримання цифрової моделі рельєфу, яка є основою для гідрологічного моделювання, був використаний БПЛА Trimble UX5 з камерою Sony NEX-5R. Точність визначення планових координат за ЦМР становить 6 см; висотні позначки залежно від базису стереопари та підстильної поверхні становлять 0,21 м. ЦМР створено за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення Pix4D. Дані GPS слугували вхідними для гідрологічного моделювання. Основною метою гідрологічного моделювання було: а) визначення геодезичних координат точок місцевості для побудови ЦМР у визначеній системі координат; б) оцінка точності ЦМР та вимірювання глибини русла в модульованій частині річки, які в свою чергу використовувались для опису рельєфу дна. Інформація про витрату води отримували на гідрографах. Гідрологічна інформація про потік води може бути отримана за допомогою а) графіків або таблиць з даними залежності потоку води від абсолютної висоти, б) коефіцієнтів шорсткості підстилаючої поверхні і в) коефіцієнта рівня нахилу поверхні русла.

### **Технологічна схема досліджень**

Дослідження виконували в декілька етапів, зокрема польові дослідження, створення і редагування ЦМР, моделювання затоплень. Детальну схему досліджень подано на рис. 1.

### **Вибір моделі**

Залежно від детальності вхідних даних і типу місцевості для гідрологічного моделювання використовують одновимірні та двовимірні моделі, які засновано на розв'язку різного типу рівнянь. В одновимірній моделі морфометричні характеристики потоку усереднені по ширині і глибині і розглядаються вздовж осі  $x$ . У двовимірній моделі потік розглядають вздовж осі  $x$  по ширині і глибині із збільшенням кількості точок. Враховуючи незначну ширину річки (15-20 м) застосовано одновимірну модель сталого руху потоку за

рівнянням Манінга, яке розв'язують числовим методом у модулі HEC-RAS.

Одновимірні моделі дозволяють проводити розрахунки для протяжних ділянок на основі даних про морфометрію долин, представлених у вигляді окремих поперечних профілів. Результатами розрахунків у цьому випадку є зміни рівнів водної поверхні та витрат води за часом у межах ділянки розрахунку.

Для застосування двовимірних моделей потрібна більш детальна інформація про морфометрію річкових долин, представлена у вигляді хмари точок. В результаті, вони дозволяють отримати планову картину розподілу усереднених по вертикалі швидкостей течії, рівнів водної поверхні і глибин води в межах розрахункової області.

Для адаптації гідродинамічних моделей на конкретних ділянках річок необхідно визначити чутливість моделей до складу та якості вхідних даних, а також до детальності задання основного калібрувального параметра моделі – коефіцієнта шорсткості.

Рівняння Манінга – це емпірична залежність швидкості природного потоку у відкритому руслі залежно від форми і розмірів поперечного перерізу і шорсткості стінок русла

$$V = (1/C) \cdot R_h^{2/3} \cdot I^{1/2} \quad (1)$$

де  $V$  – середня швидкість (м/с);  $C$  – коефіцієнт спротиву;  $R_h$  – гідравлічний радіус (м);  $I$  – гідравлічний нахил (м/м).

Гідравлічний радіус залежить від площі поперечного перерізу змоченого периметра  $R = \omega/\chi$ , де  $\omega$  – площа поперечного перерізу,  $\chi$  – змочений периметр.

Коефіцієнт спротиву визначають за формулою Манінга [Chow, 1959]

$$C = (1/n) \cdot R^{1/6} \quad (2)$$

або загальнішою формулою Павловського

$$C = (1/n) \cdot R^y \quad (3)$$

де  $y = 2.5 \cdot n^{1/2} - 0.13 - 0.75 \cdot R^{1/2} \cdot (n^{1/2} - 0.1)$ ,  $n$  – коефіцієнт шорсткості.

Показник степеню  $y$  залежить від величини коефіцієнта шорсткості і гідравлічного радіуса, для широкої річки – її глибина.

### **Характеристика об'єкту досліджень**

Об'єктом досліджень слугувала частина р. Дністер, яка знаходиться поблизу с. Хатки та м. Самбір Львівської обл. Досліджувана ділянка характерна складним звивистим руслом ріки та суттєвими плановими зміщеннями, які за останні 70 років досягають величин до 370–420 м. Розташування ділянки дослідження подано на рис. 2.

Відцифровані за різними матеріалами русла нанесено на топографічну карту 1937 р. На цій карті спостерігається значна кількість ярів, що є наслідком ерозійних процесів. Лівий берег річки високий і становить від дзеркала води до 7 м, правий більш пологий з берегами висоти 1–4 м (рис. 3). Планові зміщення русла ріки визначено за космічними знімками із супутників Landsat 5 (1992 р.) та Landsat 7, 8 (2003 та 2014 р.) і топографічними картами (1937, 1989 р.).

Максимальні зміщення русла зауважено на ділянках 1, 2. На ділянці 1 спостерігається міграція русла в сторону залізниці, на ділянці 2 – русло у 1989 році значно змінило свій характер (голубий колір), навіть порівняно з 1937 роком. Загалом на досліджуваних ділянках річка схильна до меандрування.

Особливо небезпечним для довкілля є значний вигин ріки поблизу залізничної колії (ділянка 1). Оскільки ця ділянка характеризується стрімким обривом берега, вона не відноситься до потенційно вразливих до затоплень зон, але основна небезпека пов'язана із зсувами ґрунту, які можуть бути спричинені підмиванням берегової лінії.

### **Цифрове знімання з БПЛА та розрахунок точності побудови ЦМР**

Оскільки одновимірні моделі чутливі до точності вхідних даних (ЦМР), то для побудови ЦМР досліджуваної ділянки використано безпілотне знімання. Знімання з БПЛА Trimble UX5 виконано оптико-електронною камерою Sony NEX-5R. Аерознімання виконували при відкритій діафрагмі з позиції 5,6 при витримці 1/1250 на висоті 200 м. Опрацювання матеріалів знімання виконували в програмі Pix4D. На Рис. 4 подано центри проєкцій знімків та схему розташування опорних точок.

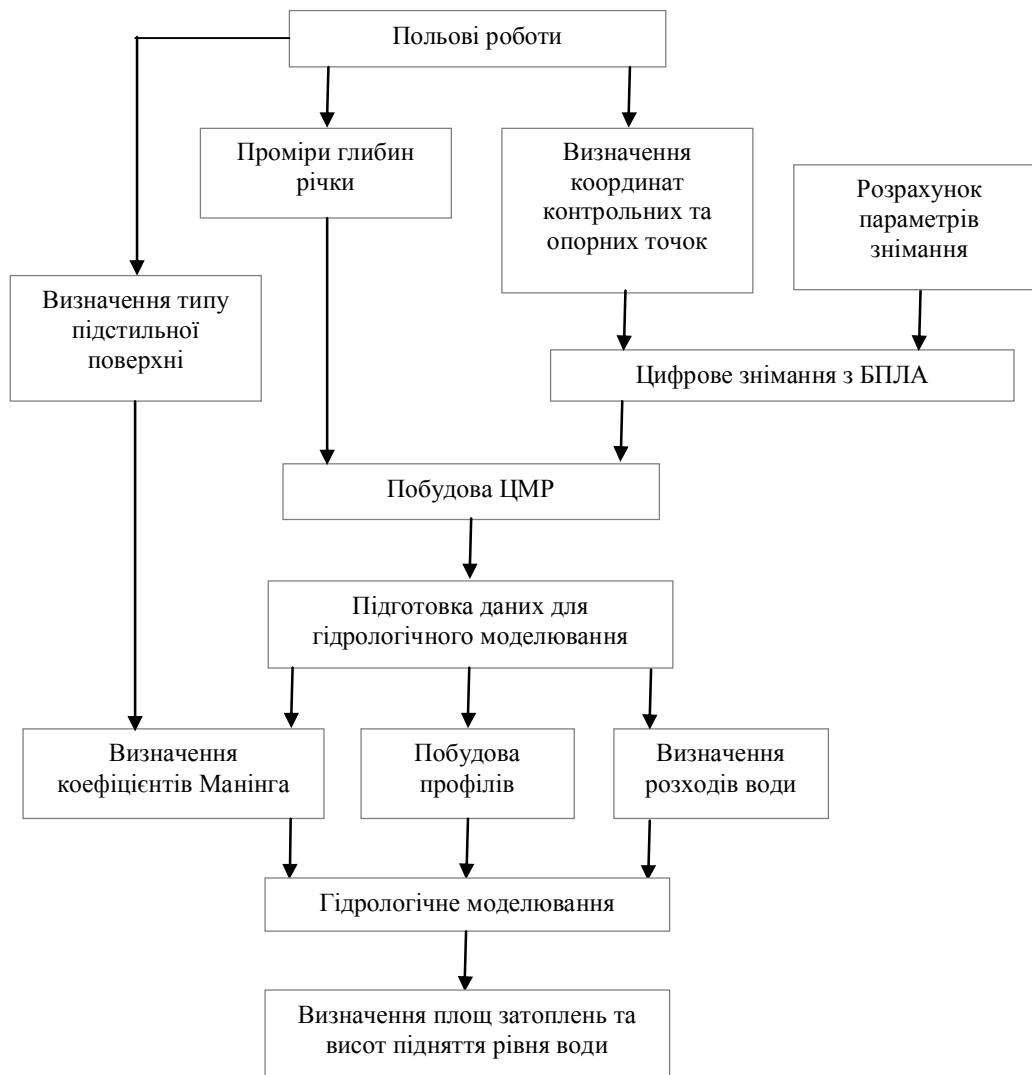


Рис.1. Загальна технологічна схема досліджень

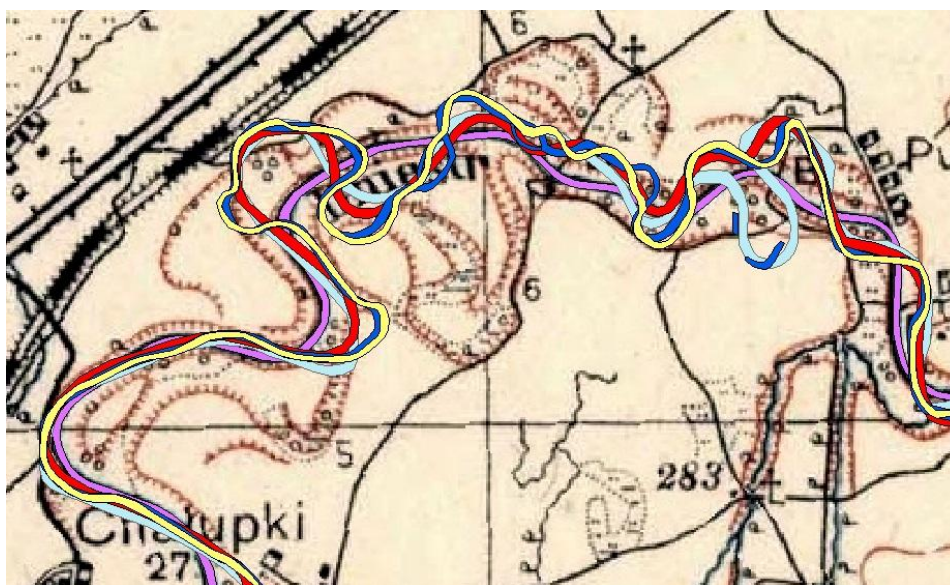


Рис. 2. Оцифровані ділянки русел річки Дністер за період 1937–2014 рр.



Рис. 3. Загальний вигляд берегів Дністра

Точність ГНСС-приймача (Trimble R7) який використовували для визначення координат опорних точок не більше 4 см в плані і 10 см по висоті. Точність GPS приймача встановленого на БПЛА – 10–20 см.

Для визначення точності планових і висотних координат точок місцевості з використанням оптико-електронних камер запропоновано вираз [Kuczyński, 2013]

$$m_{x,y} = (H/f) \cdot P_m, \quad (4)$$

$$m_h = (H/B) \cdot P_m, \quad (5)$$

де  $H$  – висота знімання;  $f$  – фокусна віддаль камери;  $P_m$  – розмір піксела на місцевості;  $B$  – базис знімання залежний від вибору перекриття знімків.

Точність визначення планових координат розраховують згідно формули 4

$$m_x = m_y = 0,005 \cdot (200/15,3) = 0,065 \text{ м} \approx 7 \text{ см.}$$

Враховуючи нестабільність літального апарату в польоті, перекриття знімків вибрано 80 %. Тоді базис на знімку становить:

$$b = 23,4 \cdot (100-80)/100 = 4,68 \text{ мм.}$$

Похибка визначення позначок висот для вибраного базису становить:

$$m_h = 200/4,68 \cdot 0,005 = 0,21 \text{ м}$$

### Побудова ЦМР

Для створення ЦМР в Pix4D генерували хмару точок. Створену TIN-модель доповнили інформацією про рельєф дна русла ріки. Дані про глибини отримали в результаті польових

вимірювань. На ділянці річки довжиною близько 9 км здійснено 258 вимірів глибини русла. Виконували по два виміри (ближче до лівого і правого берегів) з кроком близько 50 м. Фрагмент створеної ЦМР за результатами знімання, доповненої точками виміру глибин подано на рис. 5.

Для оцінювання точності використано 72 контрольні точки. Результати апостеріорної точності ЦМР (табл. 1) вказують на значні відхилення висот у місцях зарослих високою рослинністю. Тому ЦМР доопрацьовували в програмному модулі TerraScan, де виконували докласифікацію точок. Додатково в модель включали точки, отримані GNSS-спостереженнями для уточнення позначок висот рельєфу у місцях значного спотворення моделі. Після такого доопрацювання точність визначення висот точок у місцях зарослих рослинністю склала 0,31 м.

Таблиця 1

### Апостеріорна оцінка точності визначення позначок точок ЦМР досліджуваної ділянки

| Тип підстильної поверхні | Кількість контрольних точок | Середня квадратична помилка, $m_h$ (м) |
|--------------------------|-----------------------------|----------------------------------------|
| Пісок, трава             | 28                          | 0,19                                   |
| Трава, кущі, чагарники   | 44                          | 0,64                                   |



Рис. 4. Центри проєкцій (●) та опорні точки (⊕)

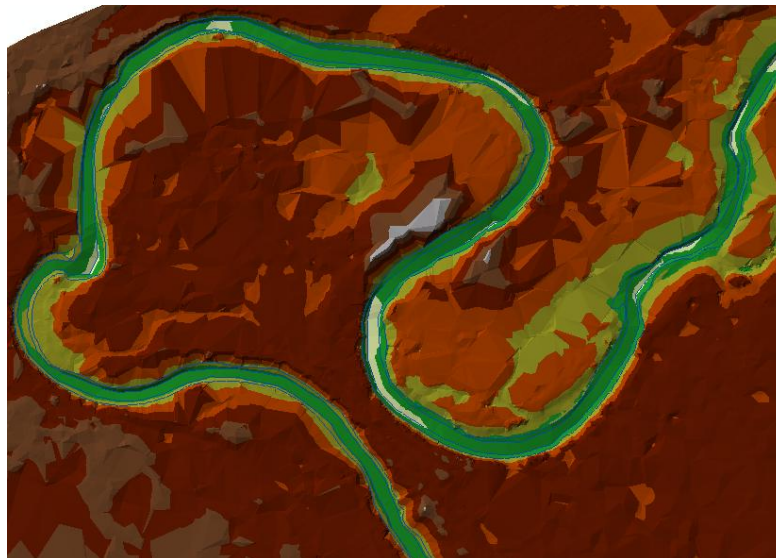


Рис. 5. Фрагмент створеної ЦМР

#### **Підготовка вхідних даних для гідрологічного моделювання**

ЦМР слугує основою для отримання інформації про позначки висот рельєфу в межах модельованої території. Для розрахунку площ затоплень в програмі HEC-RAS необхідно створити шари додаткової інформації, які включатимуть: берегові лінії річки, межі заплави, поперечні профілі, коефіцієнти шорсткості русла та приберегової території. Для створення цих шарів використано модуль HECGeo-RAS, який дозволяє використовувати інструментарій ГІС-системи ArcGIS.

Серед вище перелічених шарів принципове значення має правильність створення поперечних профілів річки, так як саме за ними виконують моделювання затоплень. До методики створення поперечних профілів висувають ряд вимог. Необхідно, щоб поперечні профілі захоплювали всю ширину заплави, обов'язково проходили перпендикулярно до русла річки та наносились зліва направо (дивлячись за течією). Відстань між сусідніми профілями необхідно вибирати залежно від зміни рельєфу, на поворотах русла кількість профілів має бути більшою. Відстань між поперечними перерізами є

функцією довжини потоку, ухилу і однорідності форми поперечного перерізу. У виконаних дослідженнях середня відстань між профілями становила 50 м. Великі однорідні річки з малими ухилами зазвичай вимагають найменшої кількості числа поперечних перерізів на кілометр. Досліджувана ділянка

відрізняється складною формою русла, де напрям потоку змінюється на  $180^\circ$ . Укласти на цій ділянці профілі необхідно досить щільно оскільки межа заплави знаходиться далеко від правого берега. Фрагмент нанесених профілів на складній ділянці русла річки подано на рис. 6.

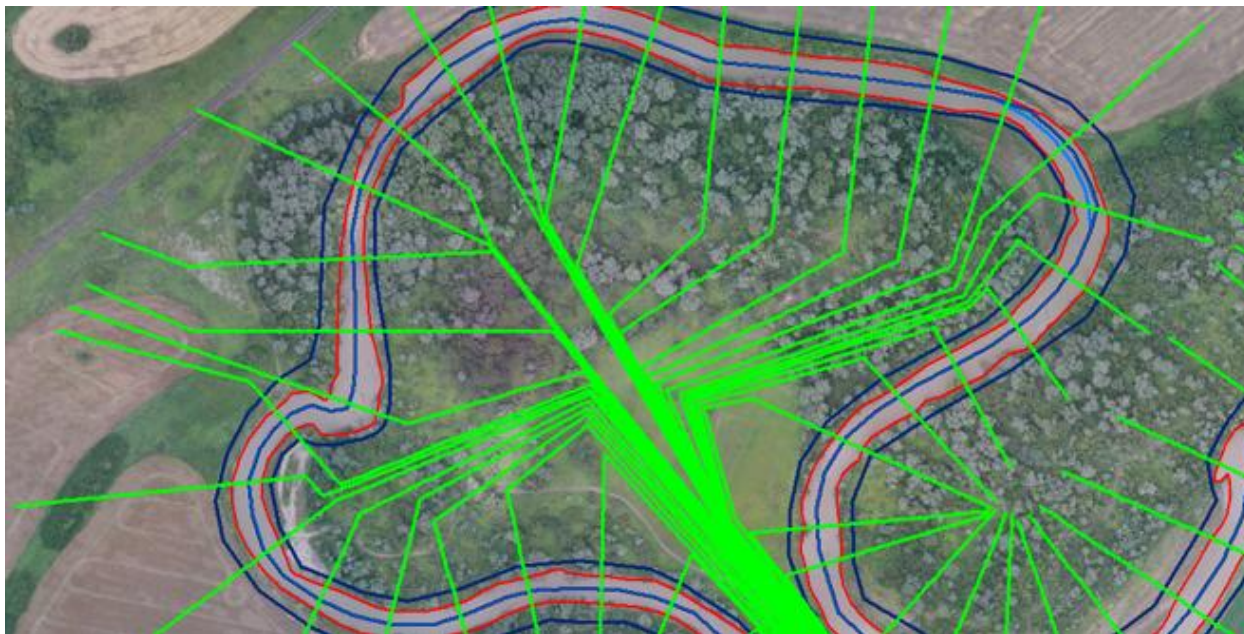


Рис. 6. Побудовані профілі

#### **Дослідження графів розходу води**

Режим річок басейну Дністра характеризується значною мінливістю за короткі проміжки часу. Аналіз щорічних гідрографів дозволяє виділити окремі фази, періоди, або сезони, в які характер коливання стоку, його величини та генезис відрізняються від суміжних періодів.

Для річок басейну Дністра особливо чітко виділяють такі періоди або сезони:

- період стоку талих вод або період *весняної повені* (весна);
- період переважання додатніх температур та переважання підземного живлення або період *літньо-осінньої межені* (літо – осінь);
- період переважання додатніх температур повітря та переважання дощового живлення або період *літньо-осінніх паводків* (літо – осінь);
- період переважання низьких температур повітря та наявність льодових явищ або період *зимової межені* (зима).

Протягом всього року, в багаторічному розрізі, вірогідність стояння високих рівнів тотожна з вірогідністю стояння низьких рівнів. Навіть для посушливих років із загальним низьким стоянням рівнів води протягом всього року властиві різкі підйоми рівня, які досягають 50–100 см і більше за добу. Певної чіткої закономірності в розподілі паводків та коротких стоянь низьких вод на Дністрі не спостерігається. Прикладом рівневого режиму річки є коливання рівня води поблизу міста Самбір зображенні на рис. 7.

Максимальні річні рівні, зазвичай, пов'язані з проходженням паводків. В окремі роки вищими є рівні під час весняної повені. Разом з тим, трапляються випадки, коли підйоми рівня відбуваються через утворення заторів.

Збереженню значних підйомів рівня, що формуються в Карпатах, сприяє порівняно мала руслова місткість річки. Береги Дністра, здебільшого є крутими, заплава – вузькою або ж відсутня зовсім.



За характером розподілу коливань рівня протягом року на Дністрі можна виділити три категорії років:

1) роки з переважаючою весняною повінню та порівняно невеликими паводками протягом іншої частини року;

2) роки з відсутньою яскраво вираженою повінню, з переважаючими паводками в літньо-осінній сезон;

3) роки з неперервним чергуванням паводків, однаково великими як весною, так і в літньо-осінній період.

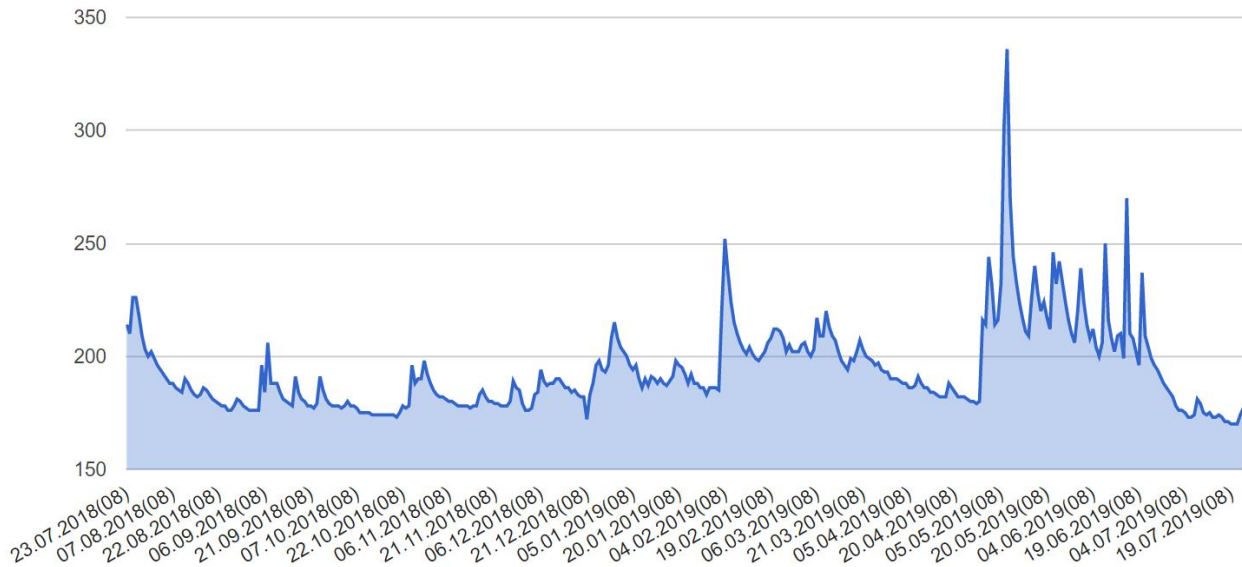


Рис. 7. Графік рівневого режиму річки Дністер за період 2018-19 рр. поблизу м. Самбір

Аналіз щоденних графіків за роки з найбільшими паводками показав, що максимальні витрати води на досліджуваній ділянці Дністра становлять до  $300 \text{ м}^3/\text{с}$ .

#### **Гідрологічне моделювання та визначення площ затоплень**

Отримані з використанням модуля HECGeoRAS векторні шари експортовано в програму HEC-RAS для моделювання (рис. 8).

Крім векторних шарів для гідрологічного моделювання необхідною є наявність значень коефіцієнтів шорсткості русла та заплави, а також значення витрат води, які характерні для річки у типовому стані та під час повені. Коефіцієнт шорсткості характеризує гідравлічний опір поверхні русла. Їх визначають зі спеціальних таблиць, залежно від типу підстильної поверхні.

Витрати води для русла досліджуваної ділянки в межевому стані становить в середньому  $10 \text{ м}^3/\text{с}$ . За витрат води в  $50 \text{ м}^3/\text{с}$  рівень річки піднімається приблизно на 1 м.

Моделювання виконували для витрат води до  $300 \text{ м}^3/\text{с}$ , що відповідає підняттю води приблизно на 4 м. Такі значення рівня води спостерігались на цій ділянці під час літніх паводків (зокрема 2008 р). На рис. 9 подано один з профілів, на які накладено рівні підняття води після моделювання. На рис. 10 подано ортозображення із змодельованою площею затоплення для розходу води в  $300 \text{ м}^3/\text{с}$ .

В табл. 2 подано розраховану площу затоплень для різних витрат води річкою.

Таблиця 2

#### **Площі затоплень за різних витрат води**

| Витрати води руслом, $\text{м}^3/\text{с}$ | Рівень підняття води, м | Прогнозована площа затоплень, $\text{км}^2$ |
|--------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------|
| 50                                         | 1                       | 0,108                                       |
| 100                                        | 2                       | 0,169                                       |
| 200                                        | 3                       | 0,341                                       |
| 300                                        | 4                       | 1,068                                       |

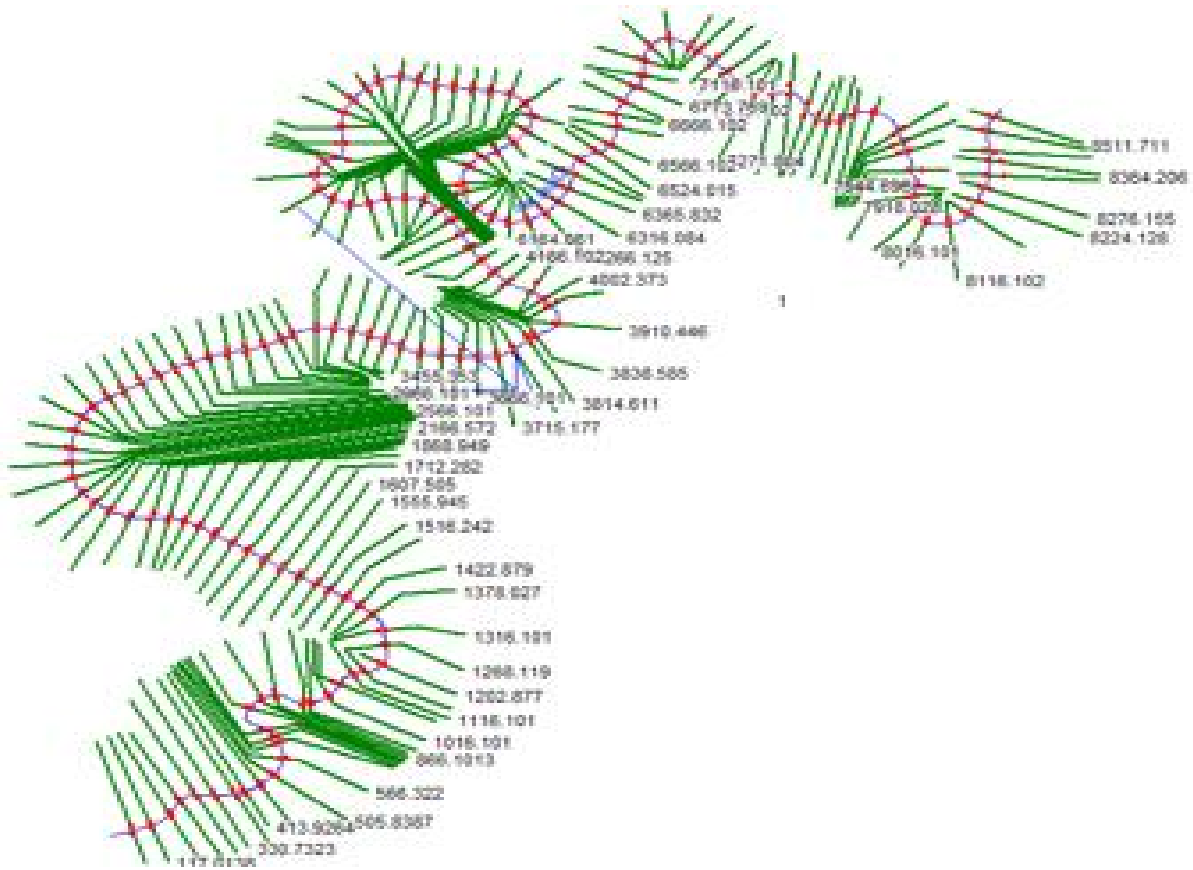


Рис. 8. Візуалізація даних для моделювання в програмі HEC-RAS

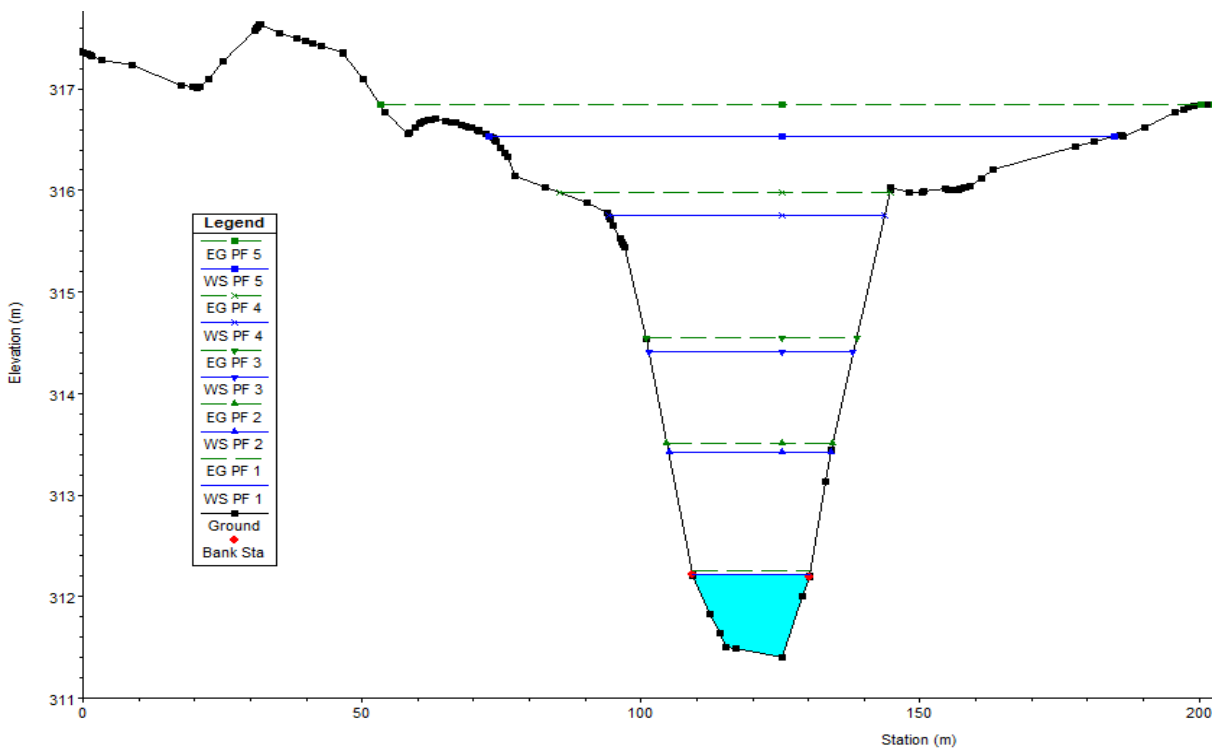


Рис. 9. Приклад профілю річки з позначеними рівнями підняття води для різних витрат



Рис. 10. Затоплена територія для витрат води в  $300 \text{ м}^3/\text{с}$

Підсумовуючи результати слід зазначити, що кожен річку необхідно досліджувати окремо. Достовірність гідрологічного моделювання залежить від таких основних чинників:

- типу моделі, прийнятої для моделювання, яка залежить від характеристик річки (ширини водної поверхні, заплави, нахил річки);

- точності цифрової моделі рельєфу, яка слугує підставою для вибору профільних ліній;

- рівня підйому води, що пов'язане з розходом води, на підставі гідрографа, отриманого з гідрометеорологічної станції;

- типів підстильної поверхні, отриманих з наземних досліджень або топографічних даних.

Таким чином, для вибраної ділянки досліджень із складним типом меандрування річки Дністер, а також дії ерозійних процесів, особливо ретельно необхідно будувати ЦМР для визначення профільних ліній, які є основою гідрологічного моделювання. Тип підстильної поверхні враховано в межах русла річки і її заплави, коефіцієнти змінюються в межах від 0,35 до 0,8.

*Публікацію фінансує Польське національне агентство з питань академічного обміну за Програмою Міжнародних академічних партнерств з проекту “Організація 9 Міжнародної науково-технічної конференції “Інженерія довкілля, фотограмметрія, геоінформатика – сучасні технології та перспективи розвитку”.*

### Висновки

1. З метою запобігання матеріальним втратам та своєчасного оповіщення населення про загрозові повеневі явища в сучасних технологіях визначення площ затоплених земель використовують методи гідрологічного моделювання.
2. Автоматизоване гідрологічне моделювання базується на використанні ЦМР, як основи для визначення площ затоплень, вибору типу моделі залежно від морфометричних характеристик річки та типу підстильної поверхні русла та заплави.
3. Об'єктом моделювання слугувала ділянка річки Дністер довжиною близько 9 км із складним типом меандрування при переході з гірської частини на рівнину.
4. Враховуючи незначну ширину річки (15–20 м) для моделювання вибрано одновимірну модель, на теоретичних засадах якої створено автоматизований модуль HEC-RAS, широко використовуваний у світовій практиці.
5. Через складний рельєф місцевості та тип річки для побудови ЦМР використано дані безпілотного знімання з точністю визначення координат 0,21 м. Апостеріорну оцінку точності здійсненої на підставі контрольних точок виміряних в процесі GNSS-знімання. Встановлено, що в місцях з чагарниковою та високою трав'яною рослинністю точність визначення позначок становить 0,64 м. Тому виконано доопрацювання

- моделі в модулі TerraScan для уточнення висот точок.
6. З метою покращення параметрів моделі в польових умовах виконано виміри глибин річки та визначено значення коефіцієнтів Манінга для русла та заплави.
  7. Гідрологічне моделювання вибраної ділянки річки Дністер здійснено для 4 рівнів підняття води.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Алабян А. М., Зеленцов В. А., Крыленко И. Н., Потрясаев С. А., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Оперативное прогнозирование наводнений на основе комплексного упреждающего моделирования и интеграции разнородных данных. *Труды СПИИРАН*. 2015. Вып. 41. С. 5–33.
- Карпець К. М. Застосування методів ГІС-аналізу для моделювання зони повені та витрат води під час паводка з метою запобігання виникнення надзвичайних ситуацій. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2014. Вип. 20. С. 82–86.
- Ковальчук І., Михнович А. Моделювання паводків у долині верхнього Дністра. *Праці Наукового товариства ім. Шевченка. Львів. XXIII: Екологічний збірник. Дослідження біотичного й ландшафтного розмаїття та його збереження*. 293–312.
- Левашова И. А. Гидравлические сопротивления речных русел: автореферат дис. кандидата географ. наук: 11.00.07. *Рос. гос. гидрометеорол. ин-т*. Санкт-Петербург, 1993, 16 с.
- Мельник Т. П. Застосування ГІС для потреби попередження стихійних гідрологічних явищ. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія: Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління*. 2012. № 1037, вип. 20. С. 125–132.
- Стародуб Ю. П., Гавриць А. П. (2015). Використання допоміжного програмного забезпечення HEC-GeoRAS та HEC-RAS в проектах підвищення стану безпеки території. *Управління проектами та розвиток виробництва*. 2015. № 1. С. 30–35.
- Burshtynska Kh., Babushka A., Tretyak S. & Halochkin M. Monitoring of the riverbed of river Dniester using remote sensing data and GIS technologies. *25th Anniversary Conference Geographic Information Systems Conference and Exhibition "GIS ODYSSEY 2018"*. p. 64–73.
- Burshtynska Kh., Shevchuk V., Tretyak S. & Vekliuk V. Monitoring of the riverbeds of rivers Dniester and Tisza of the Carpathian region. *XXIII ISPRS Congress, Commission VII (Vol. XLIB7) 12–19 July 2016, Prague, Czech Republic*. p. 177–182, doi:10.5194/isprs-archives-XLI-B7-177-2016.
- Chow, V. T. (1959). *Open channel Hydraulics*. McGraw-Hill Book Company, Inc., 350 p.
- Gharbi M., Soualmia A., Dartus D., Masbernat L. & J. Mater. Comparison of 1D and 2D Hydraulic Models for Floods Simulation on the Medjerda River in Tunisia. *Journal of Materials and Environmental Science*. No. 7 (8), 3017–3026.
- Khaleghi Somaiyeh, Mahmoodi Mehran & Karimzadeh Sorayya. Integrated application of HEC-RAS and GIS and RS for flood risk assessment in Lighvan Chai River. *International Journal of Engineering Science Invention*. Volume 4 Issue 4, 38–45.
- Kurczynski Z. *Aerial and satellite imaging of the Earth*. Part. 2. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa. 2013. (Poland)
- Sandhyarekha & Shivapur A. V. Floodplain mapping of River Krishnana using HEC-RAS model at two stretches namely Kudachi and Ugar villages of Belagavi district, Karnataka. *International Research Journal of Engineering and Technology*. Volume: 04 Issue: 08, 1524–1529.
- Sharkey, Jennifer Kay. Investigating Instabilities with HEC-RAS Unsteady Flow Modeling for Regulated Rivers at Low Flow Stages. *Master's Thesis, University of Tennessee*, 2014.
- Silva F. V., Bonumá N. B. & Uda P. K. Flood mapping in urban area using HEC-RAS model supported by GIS. *6-th international conference on flood management*, September 2014 – Sao Paulo – Brazil..

Kh. V. BURSHTYNSKA, A. V. BABUSHKA\*, M. K. HALOCHKIN

Department of Photogrammetry and Geoinformatics, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery Str., Lviv, 79013, Ukraine, +38(096)4768773, e-mail: andriy.babushka@gmail.com

#### HYDROLOGICAL PROCESSES MODELING USING GIS ARCGIS AND MODULE HEC-RAS

**Aim** of this research is to determine the area of land flooding according to a reasonably chosen hydrological model for a complex section of the Dniester River at the place of transition from the foothill to the plain with complex meandering and significant shifts of the river. **Methods.** The method of investigation of flooded areas as a result of water rise to a certain level has been processed. It includes: survey of the area with UAVs; the implementation of geodetic and hydrological activities in the field of research; creation of DEM based on survey results and analysis of its accuracy; hydrological modeling using the HEC-RAS software package; and determination of flood areas. In order to obtain the digital elevation model, which is the basis for hydrological modeling, a Trimble UX5 UAV with a Sony NEX-5R camera was used. To accurately determine DEM coordinates, a standard error for horizontal coordinates of 6 cm was established; elevation coordinates depending on the basis of images and the underlying surface equals 0,21m. The DEM was created using the specialized software Pix4D. GPS data was given as input to the hydrological modeling. **Results.** The DEM was created according to the results obtained from the UAV to the average quadratic error of 0.2 m. The technique of hydrological modeling implemented on the part of the Dniester River with a complex configuration of the channel was processed. Areas have been designated including the area of flooding at different water levels of. **Scientific novelty** is the development of a methodology for determining flooded areas based on the hydrological modeling using the HEC-RAS module for the Dniester River section, which is characterized by significant erosion of coastal soils, complicated meandering and transition from foothill to plain topography. Such conditions require precise determination of modeling parameters. In order to obtain input data for flood modeling, the UAV survey was carried out with a preliminary justification of the accuracy characteristics. **The practical significance.** Hydrological modeling is performed in order to predict the consequences of material losses due to flood events occurring in the Pre-Carpathian region. The timely receipt of information about these processes; and the monitoring of hydrological posts on the water level, which fills the beds and floodplains, allow through appropriate administrative structures to notify the population and take measures to reduce the losses resulting from these devastating phenomena. The proposed study is aimed at obtaining information on flood areas due to different levels of water uplift in the Dniester River.

*Key words:* hydrological modeling; HEC-RAS; flooding; hydrology; unmanned aerial vehicles; digital elevation model.

Надійшла 28.10.2019 р.