

КАРТОГРАФІЯ І АЕРОФОТОЗНІМАННЯ

УДК 528.7

Христина БУРШТИНСЬКА¹, Анджей МАЗУР², Максим ГАЛОЧКІН³, Євген ШИЛО⁴,
Ірина ЗАЯЦЬ⁵

¹ Кафедра фотограмметрії та геоінформатики, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна, тел. +38(067)2561130, ел. пошта: khrystyna.i.burshtynska@lpnu.ua, <http://orcid.org/0000-0002-6013-0873>

² Кафедра інженерії навколишнього середовища та геодезії, Університет природничих наук, вул. Лещинського, 7, Люблін, Польща, тел: (+48)815248128, ел. пошта: andrzej.mazur@up.lublin.pl

³ Кафедра фотограмметрії та геоінформатики, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна, тел. +38(095)8284467, ел. пошта: maksym.k.halochkin@lpnu.ua, <http://orcid.org/0000-0002-2778-3602>

⁴ Кафедра інженерної геодезії, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна, тел. +38(067)1631917, ел. пошта: yevhenii.o.shylo@lpnu.ua, <http://orcid.org/0000-0002-3838-5431>

⁵ Кафедра фотограмметрії та геоінформатики, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна, тел. +38(097)2470009, ел. пошта: iryna.v.dolynska@lpnu.ua

ВИКОРИСТАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ, ОТРИМАНИХ ІЗ БПЛА, ДЛЯ ПОБУДОВИ ЦМР ПРИРУСЛОВИХ ТЕРИТОРІЙ ЗІ СКЛАДНИМИ ГІДРОМОРФОЛОГІЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Мета роботи – дослідження точності побудови ЦМР прируслових територій із використанням матеріалів БПЛА. Одним із важливих питань гідрологічного моделювання затоплень є високоточне створення ЦМР. За складного типу рельєфу, який пов'язаний із меандруванням русла річки, запропоновано для створення ЦМР використовувати знімання із БПЛА. Гідрологічне моделювання передбачає такі основні етапи: створення високоточних ЦМР, визначення коефіцієнтів Маннінга з метою урахування впливу підстильної поверхні та визначення змін рівня води на підставі графу, отриманого із спостережень на гідрометеорологічних пунктах. У цьому дослідженні висвітлено побудову високоточної ЦМР на підставі знімання із БПЛА. Для високоточної побудови моделі принциповим питанням є урахування рослинності в приберегових ділянках і вибір оптимального часового періоду знімання. Завдання дослідження полягає в опрацюванні методики побудови високоточної ЦМР за матеріалами, отриманими з БПЛА, дослідження можливостей усунення впливу рослинності на позначки точок із використанням програмних методів, визначення планових зміщень русла та порівняння точності побудови ЦМР за зніманнями, проведеними у червні 2017 р. та у листопаді 2021 р. Об'єктом досліджень слугувала ділянка на переході від гірської до болотисто-горбистої частини річки Дністер поблизу міста Старий Самбір, зі складними морфометричними та гідрологічними характеристиками русла та берегів у місці складного меандрування річки в перетнутій ярами місцевості. *Результати*: встановлено, що за чотири роки між двома зніманнями планові зміщення деяких точок становлять до 25–31 м. Здійснено апріорну оцінку визначення координат за точками з ГНСС-приймача, точність визначення координат точок якого становить 2–3 см. Апріорна оцінка точності визначення координат точок за входними даними знімання становить: для планових координат – 4–6 см для двох періодів знімання, похибка визначення позначок точок для різних значень базису – 21–31 см. Встановлено, що програмні методи урахування впливу високої рослинності не уможливають повного її врахування, середня квадратична помилка у місцях із такою рослинністю становить 0,64 м. Тому знімання з БПЛА необхідно виконувати в безлистяний період року, раною весною або пізно восени. Наукова новизна полягає у дослідженні можливостей побудови високоточної ЦМР для різного типу рослинності за матеріалами, отриманими з БПЛА. Результати можна використовувати для гідрологічного моделювання русел рік зі складними гідроморфологічними характеристиками.

Ключові слова: точність ЦМР; руслові процеси; річка Дністер; БПЛА; гідрологічне моделювання.

Вступ

Проблема визначення змін русел річок та ведення їх моніторингу актуальна, про що свідчить низка державних та адміністративних постанов і

рекомендацій, а також численні науково-дослідницькі праці.

У 1995 р. в Україні ухвалено Водний кодекс; у 2001 р. – Земельний кодекс; постанови

Кабінету Міністрів України різних типів, які стосувалися водоохоронної діяльності, прийнято у 1996 та 2009 рр. У Земельному кадастрі дослідження руслових процесів пов'язано із визначенням охоронних зон та встановленням нормативних обмежень.

Актуальна ця проблематика в Європі. У 2000 р. прийнято Водну рамкову директиву ЄС, яка визначає головні принципи управління водними ресурсами та шляхи досягнення доброї якості води та безпечного стану річок і водойм. Одним із головних принципів, викладених у Водній рамковій директиві ЄС, є інтегрована басейнова модель управління водними ресурсами, що передбачає спільні дії усіх держав, розташованих у басейнах річок. Директива № 2007/60/ЄС Європейського парламенту і Ради ЄС про оцінку і управління ризиками та план заходів з оцінювання та управління ризиками повеней спрямовані на зменшення негативних наслідків повеневих явищ для здоров'я людей, довкілля, культурної спадщини та економічної діяльності.

Опрацюванням плану із протипаводкового захисту річки Дунай займається Експертна група з протипаводкового захисту – Міжнародна комісія із захисту р. Дунай.

У Польщі опрацьовано проєкт ISOK “Програмна система захисту країни від надзвичайних загроз”, спрямований на створення системи, що покращить захист економіки, довкілля та суспільства від надзвичайних загроз, зокрема від паводків і повеней. Проєкт визначає сфери, у яких існує загроза життю та майну, що в підсумку призведе до обмеження економічної експансії у напрямках, пов'язаних із експлуатацією річкових систем. Кінцевим результатом діяльності є електронна інформаційна платформа з необхідними реєстровими довідниками як важливий інструмент для урегулювання криз [ISOK].

Через недостатню вивченість питань руслових процесів, зокрема через відсутність або нестачу даних про морфодинамічну характеристику русел річок, геологічних та гідрологічних особливостей річок, трапляються випадки знищення гідротехнічних об'єктів, аварії різних споруд і комунікацій, пов'язаних із переходами через річки, виникають матеріальні втрати через затоплені та підтоплені сільськогосподарські землі та населені пункти.

Зважаючи на періодичність виникнення паводків в Україні та їх негативний вплив на руслові системи, можна стверджувати, що безперервний моніторинг водних об'єктів, як і прогнозування зон затоплених земель внаслідок паводків, має важливе значення і необхідний для розв'язання прикладних задач.

Такі спостереження ґрунтуються на використанні методів дистанційного зондування Землі та ГІС-технологій, що уможлиблює регулярне відстеження стану територій, забезпечує широку оглядовість, повторюваність, високу оперативність одержання та опрацювання інформації. Крім того, використання даних ДЗЗ та ГІС-технологій відкриває нові можливості для оперативного прогнозування зон можливого затоплення, попереднього оцінювання масштабів повеней, моделювання географічних об'єктів, визначення найдоцільніших місць для розташування захисних споруд, а також контролю зони прибережних територій.

Сьогодні постає необхідність детального опрацювання методів організації моніторингу зміщення русел річок, дослідження процесів їх меандрування, що пов'язано зі зміною водоохоронних зон, а також із визначенням затоплених земель. Сучасні геоінформаційні системи, зокрема спеціальні модулі, дають змогу за певними гідрологічними моделями визначати зони затоплення та здійснювати прогнозування таких зон, складати тематичні карти, пов'язані із підтопленням та затопленням земель. Вивчення руслових процесів зумовлює заходи, які дають змогу запобігти катастрофічним ситуаціям та уникнути значних економічних втрат.

На складних ділянках русел річок і вільного меандрування, яке призводить до зміщень русла, передусім необхідно визначати всі деформації річки. Постійні зміни конфігурації русел найчастіше відбуваються на складних морфометричних формах рельєфу із швидкорозмивними ґрунтами. Для виконання гідрологічного моделювання із визначенням площ затоплених земель необхідно на таких ділянках використовувати схему, яка складається із двох технологічно пов'язаних методик: визначення горизонтальних зміщень русла річки та створення високоточної ЦМР і на її основі гідрологічне моделювання зон затоплених земель.

Аналіз літератури. Створення цифрової моделі рельєфу (ЦМР) прируслових територій ускладнюється дією гідроморфологічного процесу як визначального чинника, що впливає на горизонтальне зміщення алювіального річкового русла в межах заплави. У спеціальній літературі [Hooke, 2006; Krzemień, 2006] вказано, що гідролого-морфологічний напрям теорії руслових процесів ґрунтується на узагальненні руслових форм і утворень та на визначенні швидкостей їх переміщення з метою розроблення прогнозів, пов'язаних із русловими процесами. Зауважено, що гідроморфологічний процес істотно залежить від зміни загальної морфометрії рельєфу і його зміни за великої протяжності русла

Як зазначено в роботі [Korpak et al., 2008], руслові процеси залежать від природних та антропогенних чинників, фізичних умов і середовища, що характеризує ландшафт водозбору. Вивчення руслових процесів зумовлює заходи, які дають змогу запобігти катастрофічним руйнуванням та уникнути значних економічних втрат. До такого типу завдань належить оцінювання збитків через затоплення прируслових територій внаслідок повеневих чи паводкових явищ.

Відповідно до запитів практики річкові русла стали предметом досліджень природознавчих дисциплін гідрології та геоморфології й технічних гідротехніки і гідродинаміки, на підставі яких вирішено багато проблем руслових процесів. Вивчення руслових процесів має велике значення для розв'язання завдань, зумовлених численними запитами практики, вони тісно пов'язані із навколишнім середовищем, із формами проявів руслових процесів, морфологією русла та заплави [Burshtynska et al., 2016]. Автори [Krzemień, 2006; Lawler, 1993] досліджують проблеми ерозії ґрунтів і руслових процесів. Проблеми флювіальної та динамічної геоморфології, пов'язані із переформуванням русел, зокрема з умовами формування русел малих річок, висвітлив автор [Hooke, 2006]. У праці [Burshtynska et al., 2019] досліджено стійкість русел річок, проаналізовано вплив гідрологічного режиму та геологічних чинників на стійкість річок [Бубняк та ін., 1997]; ерозійно-аккумулятивні процеси і створення ними форм рельєфу описано у праці [Lawler, 1993].

Звернено увагу на природні меандруючі річки, які протікають у великих родючих долинах, у найцінніших зонах для сільського господарства та населених пунктах, які часто зазнають демографічного й економічного тиску [Рудько, Петришин, 2014; Самойленко та ін., 2009; Krzemień, 2006]. Повноводні річки впливають на населені пункти та довкілля. Це свідчить про необхідність систематичного здійснення захисних заходів від повеней та посилення контролю над ерозією берегів і міграцією меандрів. Будь-яка галузь економіки повинна враховувати діяльність річки. Будівництво мостових переходів, водозаборів, набережних та інших споруд неможливе без урахування руслових процесів. Крім того, ці споруди змінюють умови протікання річкового потоку і спричиняють цілу низку нових явищ у руслоформувальній діяльності, які необхідно передбачити, щоб забезпечити збереження і функціонування самої споруди. Важлива сфера застосування теорії руслових процесів пов'язана із сільським господарством, оскільки найбагатші лугові угіддя розташовані на річкових заплавах; діяльність річок необхідно враховувати, розробляючи проекти меліорації. Проектування робіт із регулювання русел, різного будівництва на берегах і в руслах річок повинні обґрунтовуватися прогнозами руслових зміщень, що ураховують знання умов та закономірностей формування річкових русел. Інженерні розрахунки тільки тоді достатньо обґрунтовані, коли враховують напрям та інтенсивність руслових процесів, їх можливі зміни та специфіку проявлення у різних умовах. Господарське використання річок призводить до істотних змін їхнього гідрологічного режиму, аж до виникнення якісно нових русел.

Відомі випадки, коли розорювання заплави земель призводило до змивання ґрунтів і перетворення лугов на непродуктивні території. Ці проблеми виникають не тільки на території України, а й у багатьох європейських країнах, наприклад, Нідерландах, Італії та Франції. Окремі муніципалітети вирішили планувати населені пункти, не скоординувавши ці заходи з активністю русла річок, що спричинило у майбутньому значні витрати на протипаводкові заходи і підкреслило необхідність та вагомість урахування стійкості русла у довгостроковій перспективі, про що йдеться в працях [проект

ОБСЕ/ЄСК ООН, 2015]. Подальше освоєння заплавл призводить до ще вищих рівнів повені. Тому пріоритетом нової політики у сфері землекористування є встановлення максимальних охоронних меж з урахуванням майбутнього меандрування річок.

В останні десятиріччя в Україні різко збільшилась кількість катастрофічних повеней і пов'язаних із ними соціальних та економічних втрат. Заподіяні збитки певною мірою є наслідком природних стихійних явищ, а також розбалансованості територіальної природно-ресурсної системи регіонів [Ободовський, 1997].

В останні десятиріччя для розв'язання різних тематичних завдань, які потребують високої точності визначення координат точок земної поверхні, використовують безпілотні літальні апарати (БПЛА). Точності визначення координат точок та особливостей знімання з БПЛА стосуються праці [Глотов та ін., 2014; Hlotov et al., 2017].

У роботах [Villanueva et al., 2019; Ruiz, et al., 2013] вказано, що, використовуючи БПЛА, необхідно враховувати значні зміни висот фотографування та кутів нахилу знімків. Тому необхідно виконувати знімання із великим позовжним та поперечним перекриттям.

Особливості використання БПЛА для побудови високоточних ЦМР у міських забудованих районах розглянуто в праці [Tokarczyk, et al., 2015].

Мета

Мета роботи – дослідження точності побудови ЦМР прируслових територій із використанням матеріалів БПЛА та космічних знімків.

Через недостатню вивченість питань руслових процесів, зокрема через відсутність або нестачу даних про морфодинамічну характеристику русел річок, геологічних та гідрологічних особливостей річок, трапляються випадки знищення гідротехнічних об'єктів, аварії різних споруд і комунікацій, пов'язаних із переходами через річки, виникають матеріальні втрати через затоплені та підтоплені сільськогосподарські землі та населені пункти.

В Україні в сучасних умовах гостро постало питання про додаткове дослідження річок з урахуванням гідролого-морфологічного аналізу й

оцінювання інтенсивності руслових переформувань, як і про моделювання затоплених земель з метою передбачення і зменшення ризиків, пов'язаних із надзвичайними ситуаціями.

Одним із важливих питань гідрологічного моделювання затоплень є високоточне створення ЦМР. За складного типу рельєфу, який пов'язаний із меандруванням русла річки, впливом рослинності, запропоновано для створення ЦМР використовувати знімання з БПЛА.

Методика та результати роботи

Гідрологічне моделювання передбачає такі основні етапи: створення високоточних ЦМР, визначення коефіцієнтів Маннінга із метою урахування впливу підстильної поверхні, визначення змін рівня води на підставі графу, отриманого зі спостережень на гідрометеорологічних пунктах. У цьому дослідженні описано побудову високоточної ЦМР на підставі знімання з БПЛА. Для високоточної побудови моделі принципним питанням є урахування рослинності в прибережних ділянках і вибір оптимального часового періоду знімання.

Суть дослідження полягає в опрацюванні методики побудови високоточної ЦМР за матеріалами, отриманими з БПЛА, використанні програмних засобів для усунення впливу рослинності на позначки точок та порівняння точності побудови ЦМР за зніманнями, здійсненими у червні 2017 р. та у листопаді 2021 р.

Об'єктом досліджень слугувала ділянка біля переходу від гірської до болотисто-горбистої частини річки Дністер поблизу міста Старий Самбір завдовжки близько 15 км зі складними морфометричними та гідрологічними характеристиками русла та берегів у місці меандрування річки. Місцевість відрізняється розгалуженою системою ярів і балок. Видгляд берегів русла у місці дослідження подано на рис. 1. У цьому місці річка має доволі круті береги, особливо стрімкий лівий берег з перепадом позначок між точками дна і берега до 7 м.

Основні причини руслових явищ – кліматичні, фізико-географічні та антропогенні чинники, зокрема часті повені, слабкостійкі породи та ґрунти, вирубування лісів та забір гравійно-піщаних матеріалів із русел річок.



Рис. 1. Загальний вигляд берегів р. Дністер поблизу м. Самбір: а – лівий берег, б – правий берег

Спостереження та аналіз багаторічних досліджень результатів втрат через паводки свідчать, що паводки та інші небезпечні природні явища в Україні виникають у результаті взаємодії цілої низки гідрометеорологічних та морфометричних чинників. Найважливіші із них: глобальна зміна клімату, що призводить до потужних зливних дощів, крутизна і величина схилів, незначна глибина залягання материнських порід, низька водоаккумулятивна здатність малопотужних ґрунтів, розчленованість рельєфу.

Крім того, господарська діяльність у басейнах Дністра в останні десятиліття помітно посилила вплив цих природних чинників, що збільшило силу паводків і масштаби завданих руйнувань. На формування таких високих паводків, які трапляються у Карпатському регіоні, окрім суто морфометричних та метеорологічних чинників, впливають і антропогенні фактори, зокрема одамбування русел рік, що змінює умови протікання води, стан господарювання на схилах річкових долин. Однією із основних причин посилення стихійних лих у Карпатському регіоні є безконтрольне вирубування лісів, зокрема протягом другої половини ХХ – початку ХХІ ст., коли знищено понад 100 тисяч гектарів лісу.

Використання даних дистанційного зондування Землі та ГІС-технологій відкриває нові можливості для дослідження руслових процесів та повеневих явищ.

Моніторинг руслових процесів рік, а найголовніше – визначення горизонтальних та вертикальних зміщень річки, потрібно здійснювати після проходження катастрофічних паводків, оскільки вони можуть змінювати тип русла та супроводжуватись значними ерозійними і деформаційними процесами як власне самої річки, так і території її басейну.

Загальні морфометричні характеристики ділянки річки Дністер подано в табл. 1.

Таблиця 1

Загальні морфометричні характеристики частини річки Дністер

Морфометричні характеристики досліджуваної ділянки	Дністер
Довжина, км	14,7
Довжина прямої (між кінцевими точками ділянки), км	7,2
Швидкість, м/с	3
Падіння річки, м	27
Похил річки, м/км	1,8
Звивистість	2

Технологічну схему визначення зміщень русла та побудови ЦМР за даними, отриманими з БПЛА, подано на рис. 2.

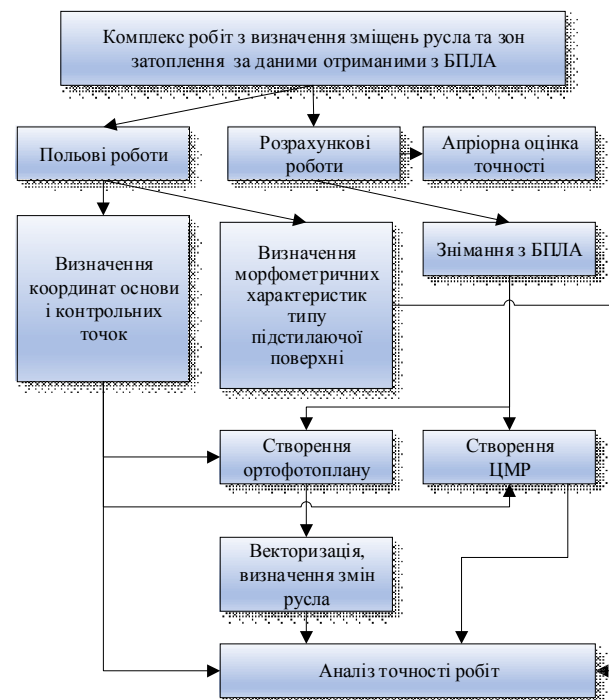


Рис. 2. Технологічна схема визначення зміщення русла та побудови ЦМР за даними, отриманими з БПЛА

До технологічної схеми входять: польові роботи, знімання із БПЛА, створення ортофотоплану для визначення зміщень русла річки та створення ЦМР з метою визначення зон затоплених земель.

Моніторинг річок на складних за геологічною структурою, морфометричними та гідрологічними характеристиками територіях потребує виконання досліджень з вищою точністю, ніж можна отримати за космічними зображеннями середнього розрізнення. Знімки з безпілотних літальних апаратів дають можливість визначати детальні горизонтальні зміни русла річки.

Знімання з БПЛА з метою уточнення горизонтальних зміщень русла і побудови ЦМР виконано у травні 2017 р. та у листопаді 2021 р.

До основних вихідних даних для гідрологічного моделювання належать: подання ЦМР у вигляді поперечників; дані про підстильну поверхню русла і прируслової території у вигляді коефіцієнтів Маннінга; дані про підняття рівня води внаслідок зливних опадів для визначеного часу, отримані з гідрографа.

Використання БПЛА ефективно для оперативного прогнозування підтоплення, зокрема і земель населених пунктів. Згідно з вимогами [Plotov et al., 2017], для прогнозування зон затоплення для річок завширшки 50–200 м топографічні плани складають у масштабі 1:2000–1:5000 із зображенням рельєфу горизонталями через 0,5–1 м. Для цих масштабів середньоквадратичні помилки позначок повинні бути у межах 1/3 перерізу рельєфу, тобто середня квадратична похибка визначення позначок для прогнозування затоплених територій повинна становити 0,16–0,30 м. За результатами досліджень апріорна точність визначення висот точок на ортофотопланах за допомогою БПЛА змінюється залежно від висоти знімання, базису цифрового знімання, фокусної віддалі камери, точності та щільності точок для геодезичної прив'язки ортофотоплану.

З метою експериментальної перевірки можливості застосування технології на основі знімання з БПЛА для прогнозування затоплення земель здійснено дослідження на підставі знімання ділянки р. Дністер площею 3 км². Для побудови ЦМР використано фотограмметричний метод визначення планових і висотних координат точок.

У 2017 р. аерознімання виконано літальним апаратом Trimble UX5 камерою Sony NEX-5R, у 2021 р. – апаратом Abris Dg Arrow камерою Sony QX1. Технічні характеристики БПЛА, цифрових

камер та основних параметрів знімання подано в табл. 2.

Таблиця 2

Технічні характеристики Trimble UX5 (камера Sony NEX-5R) та Abris dg arrow (камера Sony QX1)

Характеристика	Trimble UX5	Abris Dg Arrow
Швидкість польоту, км/год	70	60–80
Матриця фотоапарата	23,5×15,6 мм, 16.1 Мп, CMOS	23,9×15,9 мм, 20,1 Мп, CMOS
Висота знімання, <i>H</i> , м	200	250
Розмір сенсора (<i>l_x</i> × <i>l_y</i>), мм	23,5×15,6	23,9×15,9
Фокусна відстань <i>f</i> , мм	15,3	25
Розмір пікселя, <i>Δ</i> , мм	0,005	0,004
Перекриття знімків, %	80	80
Похибка визначення висоти за різних значень базису, м	0,32/0,21	0,31/0,21
Точність визначення планових координат, см	3	2

Оцінка точності визначення координат точок.

Похибку визначення планових координат точок місцевості обчислюють за формулою (1) [Лобанов, 1984]:

$$M_x = M_y = \frac{H}{f} \cdot m_x, \quad (1)$$

де *H* – висота фотографування, *f* – фокусна віддаль камери, *m_x* – СКП визначення планових координат точок на знімку.

Оскільки СКП визначення координат становить половину пікселя [Шавук, 2009], отримуємо, що *m_x* = $\frac{1}{2} \cdot \Delta$ = 0,002 мм, де Δ – розмір пікселя.

Точність визначення планових координат точок моделі розраховуємо так:

$$M_x = M_y = 0,002 \frac{250}{25,0} = 0,02 \text{ м} = 2 \text{ см.}$$

Похибку визначення позначок бачимо за формулою (2)

$$h = \frac{H}{b} \cdot \Delta p, \quad (2)$$

де Δp – різниця поздовжніх паралаксів; H – висота фотографування.

$$\Delta p = p - p_0, \quad (3)$$

де p – повздовжній паралакс, отримуваний за формулою (4) :

$$p = x_l - x_p, \quad (4)$$

де x_l – координата точки на лівому знімку; x_p – координата точки на правому знімку.

СКП паралаксу записуємо таким рівнянням (5):

$$mp^2 = m_x^2 + m_x^2 = 2m_x^2 = m_x\sqrt{2}, \quad (5)$$

де m_x – СКП визначення планових координат.

СКП різниці паралаксів розраховуємо за формулою (6)

$$\begin{cases} m_{\Delta p}^2 = m_p^2 + m_{p_0}^2 = 2m_x + 2m_x^2 = 4m_x^2 \\ m_{\Delta p} = 2m_x \end{cases} \quad (6)$$

Базис розраховуємо відповідно до формули:

$$b = l \frac{100 - p\%}{100}. \quad (7)$$

Підставивши значення в формулу (7), отримуємо (8):

$$\begin{cases} b_1 = 15,9 \frac{100-80}{100} = 3,18 \text{ мм;} \\ b_2 = 23,9 \frac{100-80}{100} = 4,78 \text{ мм.} \end{cases} \quad (8)$$

Похибка визначення перевищень за різних значень базису становить:

$$\begin{cases} m_{h1} = \frac{250}{3,18} 0,004 = 0,31 \text{ м;} \\ m_{h2} = \frac{250}{4,78} 0,004 = 0,21 \text{ м} \end{cases} \quad (9)$$

Отже, залежно від базису знімання, апіорна точність визначення координат позначок точок становить 0,31–0,21 м, точність визначення планових координат – 2–3 см.

Враховуючи те, що знімання здійснюється на низьких висотах, де можливі відхилення від розрахованої висоти знімання, як і відхилення кутів нахилу, поздовжнє і поперечне перекриття знімків вибирають так, щоб уникнути фотографметричних розривів.

Аерознімання виконано у травні 2017 р на висоті 200 м, у листопаді 2021 р. – на висоті 250 м. Повздовжнє перекриття знімків 80 %, поперечне перекриття 80 %. Координати наземної геодезичної основи визначено за допомогою двочастотного ГНСС-приймача Trimble R7 методом RTK із використанням диференційних поправок від мережі активних ГНСС-станцій “Geoterrace” Національного університету

“Львівська політехніка”. Найближча перманентна ГНСС-станція SAMB розташована у м. Самбір на відстані 3 км від об’єкта робіт. Точність визначення горизонтальних координат геодезичної основи була у межах 2–3 см, а висотної складової – у межах 5 см. Попередньо здійснено побудову фототріангуляції мережі. Опрацювання матеріалів знімання виконано з прив’язкою центрів проєкцій знімків до геодезичної основи в програмі Pix4D.

На рис. 3, 4 подано схеми маршрутів знімання із центрами проєкцій цифрових знімків та точок геодезичної основи, визначеної ГНСС-методом.



Рис. 3. Схема розташування центрів проєкцій цифрових знімків і точок геодезичної основи 2017 р. знімання



Рис. 4. Схема розташування центрів проєкцій цифрових знімків та точок геодезичної основи 2021 р. знімання

За результатами опрацювання цифрових знімків побудовано ортофотоплани ділянки та ЦМР (рис. 5, 6).

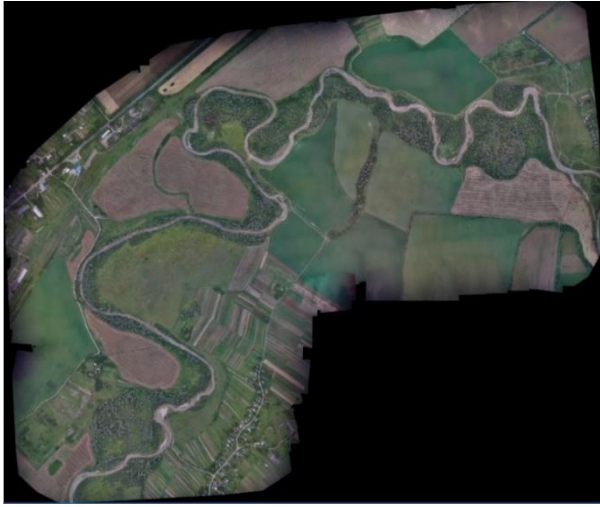


Рис. 5. Ортофотоплан ділянки р. Дністер за матеріалами Trimble UX5



Рис. 6. Ортофотоплан ділянки р. Дністер за матеріалами Abris dg arrow

Для оцінювання точності використано вимірні координати в польових умовах за допомогою ГНСС-приймача на ділянках з різним типом підстильної поверхні.

На рис. 7 подано ЦМР, побудовану за допомогою Pix4D.

З метою визначення точності ЦМР досліджуваної ділянки на місцевості здійснено ідентифікацію характерних точок і визначено планово-висотні координати. На рис. 8 подано

розташування цих точок на місцевості. Особливу увагу звернено на точність визначення висот опознаків, оскільки за ЦМР здійснюється гідрологічне моделювання висот точок.

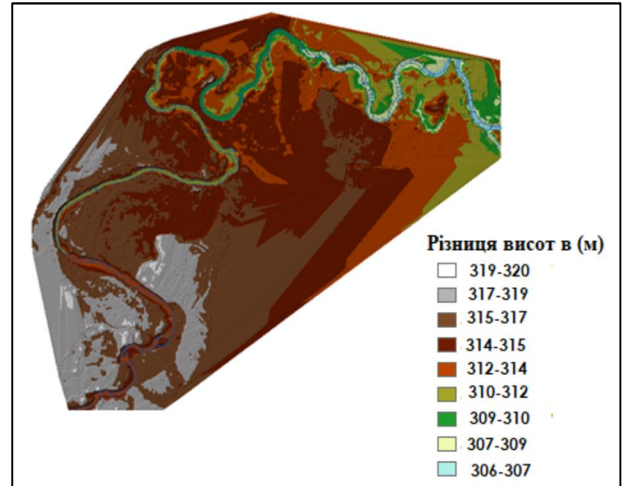


Рис. 7. Цифрова модель рельєфу досліджуваної ділянки р. Дністер: 2017 р.

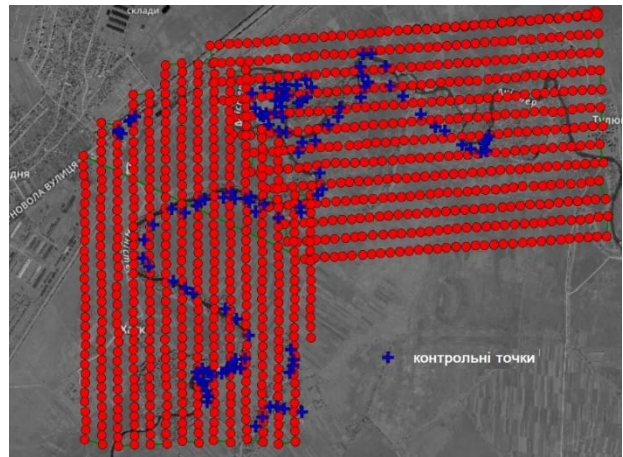


Рис. 8. Схема розташування контрольних точок: знімання 2017 р.

Цифрову модель місцевості з метою усунення високої рослинності (дерева, кущі) опрацьовано за допомогою модулів Terra Modeler та Terra Scan. Однак виправити модель за рахунок високої трав'янистої та щільної кущової рослинності повністю не вдалося, середня квадратична помилка з урахуванням такої рослинності становила 0,64 м.

За результатами визначених позначок контрольних точок та отриманих із ЦМР, побудованої за допомогою програмного забезпечення

Pix4D, обчислено різниці позначок Δh , поданих у табл. 3.

Середня квадратична похибка визначення позначок з ЦМР порівняно із даними ГНСС для всієї вибірки даних (44 точки) становить 0,64 м, а за даними, визначеними з вибірки для підстильної поверхні, пісок та низька трава (28 точок) займають 0,31 м. Ці результати свідчать про те, що реальне застосування БПЛА для прогнозування затоплення територій неможливе у разі знімання у весняний період із густим листяним покриттям.

Таблиця 3

Результати визначення позначок контрольних точок методом ГНСС та з ЦМР, побудованої за допомогою програмного забезпечення Pix4D

Об'єкт знімання	Кількість контрольних точок	Середня квадратична похибка m_h , м
Пісок, низька трава	28	0,31
Трава, кущі, чагарники	44	0,64

Варто зауважити, що середні квадратичні похибки визначення висотної складової, які ми отримали, приблизно у два рази більші порівняно із результатами, які стосуються поверхонь без рослинності. Очевидно, це пов'язано передусім з ідентифікацією контрольних точок на земній поверхні, покритій щільною і високою рослинністю.

Оскільки за результатами дослідження точності ЦМР за матеріалами 2017 р. не вдалося виправити модель програмно, повторно здійснено знімання цієї самої ділянки у листопаді 2021 р., коли дерева і кущі скинули листя, а висока трава пожухла або була скошена. Побудовану ЦМР із контрольними точками для визначення апостеріорної оцінки точності подано на рис. 9.

Результати порівняння позначок контрольних точок за ГНСС-зніманням та побудованою ЦМР подано в табл. 4.

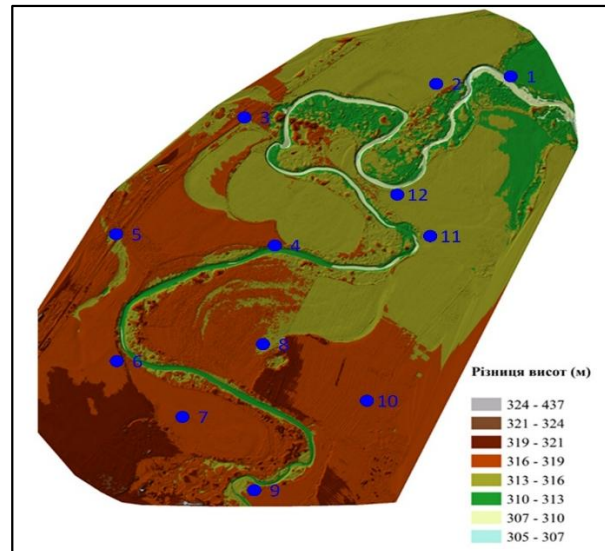


Рис. 9. Цифрова модель рельєфу з контрольними точками за зніманням 2021 р.

Таблиця 4

Порівняння різниці висотних позначок

№ точки	ГНСС, м	2021, м	Δh , м
1	312,891	313,248	-0,357
2	315,251	315,410	-0,160
3	317,862	317,931	-0,069
4	316,699	316,903	-0,204
5	319,060	318,546	0,514
6	318,329	318,785	-0,457
7	316,352	316,364	-0,012
8	315,894	315,809	0,084
9	317,801	317,937	-0,136
10	317,157	316,857	0,300
11	314,202	314,160	0,042
12	314,609	314,736	-0,127

СКП визначення точок обчислюємо за виразом:

$$m = \sqrt{\sum \Delta h_i^2 / n}, \quad (10)$$

Середня квадратична помилка визначення позначок точок, обчислена на підставі порівняння відповідних позначок контрольних точок, отриманих із ГНСС-спостережень, і даних із вимірювань побудованої ЦМР, дорівнює 0,26 м.

Наукова новизна і практична значущість

Наукова новизна полягає у дослідженні можливостей побудови високоточної ЦМР для різних типів рослинності за матеріалами, одержаними з БПЛА. Результати можна використати для гідрологічного моделювання русел рік зі складними гідроморфологічними характеристиками.

За результатами обчислень встановлено, що точність побудови ЦМР відповідає апріорній оцінці точності. Тому знімання земної поверхні з високою трав'янистою та кущовою рослинністю необхідно виконувати ранньою весною або восени за безлистою покриву і відсутності трав'яної рослинності.

Висновки

Виконані дослідження дають підстави для висновку про доцільність аерознімання із БПЛА прируслових територій зі складними морфометричними та гідрологічними характеристиками.

Оцінка точності побудованої цифрової моделі рельєфу за результатами знімання у травні 2017 р. за наявності високої трав'янистої та кущової рослинності, отримана за 44 контрольними точками, містить СКП = 0,44 м.

Це свідчить про те, що опрацювання моделі із використанням модулів Terra Modeler та Terra Scan не дає задовільних результатів для підвищення точності ЦМР, придатної для подальшого гідрологічного моделювання.

Аерознімання цієї самої ділянки в безлистий період в листопаді 2021 р. з подальшою оцінкою точності за 12 контрольними точками, СКП = 0,26 м, свідчить, що точність визначення позначок в 2,5 разу вища, ніж за знімання в пізновесняний період. Це дає підстави стверджувати, що період знімання є принциповим для отримання високоточної ЦМР з метою подальшого гідрологічного моделювання, тому аерознімання доцільно виконувати ранньою весною або пізно восени в час відсутності листяного покриву і зменшення впливу трав'янистої рослинності.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

Глотов В., Церклевич А., Збруцький О., Колісниченко В., Прохорчук О., Карнаушенко Р., & Галецький В. Аналіз і перспективи аерознімання

з безпілотного літального апарата. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. 2014. Вип. I (27). С. 131–137. <https://vlp.com.ua/node/12295>

- Бубняк І., Бубняк, А. Про природу Стрийського юрського прогину. *Праці НТШ Т 1. Геологія, геофізика, хемія, біохемія, матеріалознавство, механіка матеріалів*. 1997. С. 69–72.
- Лобанов А. Н. Фотограмметрия. Москва: Недра, 1984. С. 552.
- Ободовський О. Г. Оцінка стійкості русел річок Середнього та Нижнього Придніпров'я. *Меліорація і водне господарство*. 1997. № 84. С. 131–137.
- Проект ОБСЕ/ЕЖ ООН: Трансграничне співробітництво и устойчивое управление бассейном реки Днестр (ноябрь 2015). <https://www.osce.org/files/f/documents/d/6/104060.pdf>
- Рудько Г. І., Петришин В. Ю. Характеристика родовищ валунно-гравійно-піщаних порід у Львівській області та їх вплив на екологічний стан природного середовища. *Мінеральні ресурси України*. 2014. № 1. С. 39–47.
- Самойленко Л. І., Колос Л. М., Підгородецька Л. В. Інформаційна технологія моніторингу повеней з використанням даних ДЗЗ. *Космічна наука і технологія*. 2009. Том 15. № 3. С. 50–55.
- Шавук В. С. Теоретическое обоснование цифровой фотограмметрической системы обработки космических снимков высокого разрешения: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 25.00.34 "Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия". Москва, 2009. 24 с.
- Burshtynska, K. V., Babushka, A. V., Bubniak, I. M., Babi, L. V., & Tretyak, S. K. (2019). Influence of geological structures on the nature of riverbed displacements for the rivers of the Dniester basin upper part. *Geodynamics*, 2(27), 24–38. <https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/52220>
- Burshtynska, Kh., Shevchuk, V., Tretyak, S., Vekliuk, (2016). 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, 177–182, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B7-177-2016>
- Hlotov, V., Hunina, A., & Siejka, Z. (2017). Accuracy investigation of creating orthophotomaps based on images obtained by applying Trimble-UX5 UAV. *Reports on Geodesy and Geoinformatics*, 103, 106–118.
- Hooke, J. (2006). Hydromorphological adjustment in meandering river systems and the role of flood events. *Sediment Dynamics and the Hydromorphology of*

- Fluvial Systems (Proceedings of a symposium held in Dundee, UK, July 2006). 306, 127–135.
- ISOK (Informatyczny System Osłony Kraju przed nadzwyczajnymi zagrożeniami). <http://www.gugik.gov.pl/projekty/isok>.
- Korpak, J., Krzemien, K., & Radecki-Pawlik, A. (2008). Wpływ czynników antropogenicznych na zmiany koryt cieków karpaccich. *Infrastruktura i ekologia terenów wiejskich*, 04. 1–88. file:///C:/Users/%D0%93%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D0%BD%D0%B0/Downloads/Wp%C5%82yw_czynnik%C3%B3w_antropogenicznych_n.pdf
- Krzemien, K. (2006). Badania struktury i dynamiki koryt rzek karpaccich. *Infrastruktura i ekologia terenów wiejskich*, 4/1, 131–142. file:///C:/Users/%D0%93%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D0%BD%D0%B0/Downloads/Krzemien.pdf
- Lawler, D. M. (1993). The measurement of river bank erosion and lateral channel change: a review. *Earth surface processes and landforms*, 18(9), 777–821. <https://doi.org/10.1002/esp.3290180905>
- Pix4D. Hands Free Solutions for Mapping and 3D Modeling, 2013. Access mode: <http://pix4d.com/>.
- Ruiz, J. J., Diaz-Mas, L., Perez, F., & Viguria, A. (2013). Evaluating the accuracy of DEM generation algorithms from UAV imagery. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, 40, 333–337. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-529-2014>
- Tokarczyk, P., Leitao, J. P., Rieckermann, J., Schindler, K., & Blumensaat, F. (2015). High-quality observation of surface imperviousness for urban runoff modelling using UAV imagery. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(10), 4215–4228., <https://doi.org/10.5194/hess-19-4215-2015>.
- Villanueva, J. K. S., & Blanco, A. C. (2019). Optimization of ground control point (GCP) configuration for unmanned aerial vehicle (UAV) survey using structure from motion (SfM). *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 167–174. <https://www.researchgate.net/publication/331410976>.

Khrystyna BURSHTYNSKA¹, Andrzej MAZUR², Maksym HALOCHKIN³, Yevhenii SHYLO⁴, Iryna ZAYATS⁵

¹ Department of Photogrammetry and Geoinformatics, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery Str., Lviv, 79013, Ukraine, tel. +38(067)2561130, e-mail: khrystyna.i.burshtynska@lpnu.ua, <http://orcid.org/0000-0002-6013-0873>

² Department of Environmental Engineering and Geodesy, Faculty of Production Engineering, University of Life Sciences in Lublin, 7, Leszczyńskiego Str., 20-069 Lublin, tel. (+48)815248128, e-mail: andrzej.mazur@up.lublin.pl

³ Department of Photogrammetry and Geoinformatics, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery Str., Lviv, 79013, Ukraine, tel. +38(095)8284467, e-mail: maksym.k.halochkin@lpnu.ua, <http://orcid.org/0000-0002-2778-3602>

⁴ Department of Engineering Geodesy, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery Str., Lviv, 79013, Ukraine, tel. +38(067)1631917, e-mail: yevhenii.o.shylo@lpnu.ua, <http://orcid.org/0000-0002-3838-5431>

⁵ Department of Photogrammetry and Geoinformatics, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery Str., Lviv, 79013, Ukraine, tel. +38(097)2470009, e-mail: iryna.v.dolynska@lpnu.ua

USING IMAGES OBTAINED FROM UAVS TO CONSTRUCT A DEM OF RIVERBED TERRITORIES WITH COMPLEX HYDROMORPHOLOGICAL CHARACTERISTICS

The aim of the work is to investigate the accuracy of the DEM of nearshore areas using UAV material. One of the important issues in hydrological flood modelling is the high accuracy of the DEM. In the case of a complex relief type, which is associated with meandering riverbeds, it is proposed to use UAV surveys to create a DEM. Hydrological modelling involves the following main steps: creation of high precision DEMs, determination of Manning coefficients to account for the influence of the underlying surface and determination of water level changes based on the water level graph derived from observations at hydrometeorological stations. This research presents the construction of a high-precision DEM, based on a UAV survey. For high-precision modeling, the fundamental issue is the consideration of vegetation in the nearshore areas and the choice of the optimal time period for the survey. The aim of the study is to develop a methodology for the construction of a high-precision DEM from UAV data, investigate the possibilities of eliminating the influence of vegetation on point marks using software methods, determine planned channel shifts and compare the accuracy of DEM construction for surveys conducted in June 2017 and in November 2021. The study object was the section at the transition from the mountainous to marshy-hilly part of the Dniester River near the town

of Stary Sambir, with complex morphometric and hydrological characteristics of the channel and banks at the site of the complex meandering of the river in a rugged ravine area. Results. It was found that for 4 years between two surveys, the planned displacements of some points are up to 25–31 m. A priori estimation of coordinates determination by points from the GNSS-receiver was carried out, the accuracy of point coordinates determination is 2–3 cm. The a priori estimate of the accuracy of determining the coordinates of points from the input survey data is: for plan coordinates – 4–6 cm for two survey periods, the error in determining the marks of points for different values of the baseline – 21–31 cm. It is established, that the program methods of accounting of influence of high vegetation do not give the possibility of its full accounting, the average square error, in places of such vegetation makes 0.64 m. Therefore, it is necessary to carry out UAV survey in the leafless period of the year, early spring or late autumn. Scientific novelty consists in the study of the possibility of constructing a high-precision DEM for different types of vegetation from materials obtained from UAVs. The results can be used for hydrological modeling of river channels with complex hydromorphological characteristics.

Key words: DEM accuracy; channel processes; Dniester River; UAV; hydrological modeling.

Надійшла 12.03.2022 р.