

Іван КАЛИНИЧ¹, Марія НИЧВИД², Іван ПРОДАНЕЦЬ³, Наталія КАБЛАК⁴, Ярослав ВАШ⁵

¹ Кафедра геодезії, землеустрою та геоінформатики, ДВНЗ “Ужгородський національний університет”, вул. Університетська, 14, Ужгород, 88000, Україна, ел. пошта: ivan.kalynych@uzhnu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-5213-3417>

² Кафедра геодезії, землеустрою та геоінформатики, ДВНЗ “Ужгородський національний університет”, вул. Університетська, 14, Ужгород, 88000, Україна, ел. пошта: mariya.nychvyd@uzhnu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-5661-8799>

³ Закарпатська регіональна філія ДП “УкрДАГП”, вул. Грушевського, 39, Мукачево, 89600, Україна, ел. пошта: geodezcentre@gmail.com

⁴ Кафедра міського будівництва і господарства, ДВНЗ “Ужгородський національний університет”, вул. Університетська, 14, Ужгород, 88000, Україна, ел. пошта: nataliya.kablak@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2907-931X>

⁵ Кафедра кадастру територій, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна, ел. пошта: yaroslav.i.vash@lpnu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-7570-0437>

МОНІТОРИНГ ГЕОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У БАСЕЙНІ РІЧКИ ТИСА ЗА ДОПОМОГОЮ ЦИФРОВОГО АЕРОЗНІМАННЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ БПЛА AUTEL EVO II PRO RTK

Мета. У статті досліджено геодинамічні процеси в басейні річки Тиса в межах Закарпатської області з аналізом геодезичних спостережень, виконаних за останнє десятиліття. *Методика.* Карстомоніторинг було розпочато із виявлення найнебезпечніших ділянок земної поверхні, які зазнають вертикальних зміщень. Після виявлення найнебезпечніших ділянок для запобігання можливим аваріям проведено локальний геодезичний моніторинг на об’єктах у межах смт Солотвино, с. Ділове та с. Біла Церква. Для відпрацювання методики виявлення змін ландшафтів та форм рельєфу під впливом геодинамічних процесів використано також колекцію архівного аерофотознімання. *Результати.* Для знімання карстів використано БПЛА. На основі даних цифрового аерознімання створено ортофотоплани і цифрові моделі рельєфу для прогнозування карстів та зміщень. Цифрове аерознімання виконано відповідно до вимог нормативних документів. Перевага аерознімання – можливість отримати додаткову інформацію про положення річкових русел, зміни в рослинному покриві, активізацію ерозійних процесів. Для визначення динаміки зсувів, карсту цифрове аерознімання необхідно повторити кілька разів через певні інтервали. Аерознімальні роботи виконано у два етапи у 2020 та 2021 р. Для розпізнавальних знаків вибрано контурні точки, які розпізнаються на цифровому аерознімку і місцевості з точністю не менше ніж 0,1 мм у масштабі створюваного плану. Математичне опрацювання геодезичних GPS-вимірювань виконано за допомогою програмного забезпечення Trimble Geomatics Office з приведенням ліній на рівень моря і редукуванням на площину проєкції Гаусса – Крюгера. Після фотограмметричної обробки виконано контроль якості отриманих результатів та створено цифрові моделі рельєфу прийомами DEM та TIN. Ортофотоплани в масштабі 1:1 000 виготовлено за растровими зображеннями аерознімків з урахуванням створеної цифрової моделі рельєфу. Для оновлення інформації про стан сучасних карстоутворень та ділянок із екзогенними процесами в смт Солотвино та с. Біла Церква Тячівського району та с. Ділове Рахівського району Закарпатської області виникла необхідність у виконанні моніторингових робіт. Розроблено та апробовано технологію топографо-геодезичних робіт із застосуванням БПЛА і GPS-вимірювань у гірських районах. Результати аерознімання використано з метою візуалізації об’єктів дослідження та донесення інформації про деформаційні процеси до органів місцевого самоврядування. Для природних чи техногенних процесів (зміщення, зсуви, карсти) потрібне розроблення індивідуальних підходів до використання БПЛА. Подібні моніторингові дослідження виводять на новий рівень вивчення природного середовища і з кожним роком підвищуватимуть наукову цінність отриманих матеріалів. Масове використання знімачів з БПЛА дає змогу сформувати банк даних, який неможливо створити іншими методами. Розроблено методику комплексного визначення рухів на екзогенних та техногенних ділянках місцевості в гірських районах із використанням новітніх технологій, що дає можливість оперативно створити планово-висотну основу необхідної точності у референційній системі координат для розв’язання низки задач прикладної геодезії із використанням супутникових технологій і БПЛА для спостереженнями за об’єктами.

Ключові слова: цифрова фотограмметрія; цифрові моделі поверхні; моніторинг деформацій земної поверхні; безпілотний літальний апарат; ортофотоплан.

Вступ

За останні десятиліття у Карпатському регіоні почастишали випадки екологічних катастроф. Території зі спостережуваними деформаціями

земної поверхні (геотектонічні рухи, зсуви) трапляються у порівняно густонаселених районах, у промислових, сільськогосподарських, міських рекреаційних районах, а також у ландшафтах із

різним рівнем охорони природи [Калинич та ін., 2013]. Будь-які поверхневі переміщення через небезпечні процеси можуть руйнувати структури різних типів на земній поверхні, загрожувати життю та майну людини та серйозно впливати на навколишнє середовище. Основною руйнівною силою цих процесів є ґрунтові води. Зокрема, рівень підземних вод на Закарпатській низовині з кінця 60-х років XX ст. до початку 90-х знизився приблизно на 2 м, а із середини 80-х спостерігається тенденція до підвищення середньорічної температури повітря та збільшення кількості сумарних атмосферних опадів, що є, певною мірою, наслідком зміни клімату.

За даними Державної геологічної служби, в межах території України зафіксовано понад 26,0 тис. поверхневих та підземних карстопоявів. У районах ведення гірничих робіт та інтенсивного техногенного навантаження продовжується розвиток техногенного карсту, інколи із катастрофічними проявами процесу [Інформаційний щорічник, 2020]. Особливого розвитку цей процес набув у районах видобування соляних корисних копалин (Солотвинське, Калуське, Ново-Карфагенське тощо) в межах Закарпатської, Івано-Франківської, Львівської та Донецької областей.

Солотвинське родовище кам'яної солі розміщене в південно-східній частині Тячівського району Закарпатської області. Для захисту

гірничих виробок облаштовано дренаж з метою перехоплення надсольових вод. Проте у штольнях та шурфах фіксували часті вивали, які блокували самовитікання здренованих вод. Ці вивали вчасно не ліквідовували через недофінансування Солотвинського солерудника. Утворювалися штучні греблі, які спричиняли підпір надсольових вод і їх пришвидшену інфільтрацію у соляний масив по ослаблених зонах, насамперед у районі Чорного Мочара. Це призвело до тих катастрофічних наслідків, які сьогодні спостерігаються на родовищі. Порушення сталого в геологічному часі природного режиму надсольових вод призвело до активізації розчинення солей. Наявність розгалуженої системи дренажних виробок в основі четвертинних відкладень та у верхній частині соляного тіла створила зони підземного розвантаження, розширила зону активного водообміну до легкорозчинної кам'яної солі та стала головною причиною інтенсивного закарстовування території. Внаслідок затоплення шахт № 7 та № 8 (рис. 1, 2) виникли нові утворення карстових каналів, спостерігалось руйнування водотривкої покривки (палагу) та утворення провалів, через які надходять атмосферні води. Техногенно активізований карст у межах Солотвинського родовища спричинив радикальні зміни рельєфу земної поверхні, збільшення коефіцієнта стоку, зміни місць живлення і розвантаження підземних вод [Дяків, 2012].



Рис. 1. Затоплена шахта № 7



Рис. 2. Затоплена шахта № 8

Мета

У статті досліджено геодинамічні процеси (зсуви, просідання, карсти) в басейні річки Тиса в межах Закарпатської області із аналізом геодезичних спостережень, отриманих за останнє десятиліття.

Методика досліджень

На території дослідження є всі першопричини для появи і широкого розвитку деформаційних зміщень земної поверхні: висока крутизна схилів зумовлює гравітаційну асиметрію; водонасиченість надр і високий рівень дзеркала підземних вод; глобальне потепління, що призводить до перезволоження глинистого матеріалу і його текучості; чергування засушливих періодів зі зливовими опадами. Крім того, на територію впливають як глибокофокусні землетруси (зони Вранча в Румунії), так і місцеві землетруси. Антропогенна діяльність посилює ці процеси. *Найбільше вражають зміни рельєфу, зумовлені техногенно активізованим соляним карстом у межах Солотвинського родовища. Дотепер достеменно не відомо, чим спричинені деформації земної поверхні: чи пов'язані із соляним карстом, чи спричинені сильними дощами, що зумовлюють підняття підземних вод, чи пояснюються дією тектонічних плит. За останні двадцять років на досліджуваному об'єкті не проводили ніякі види карстомоніторингу, фіксували лише уже наявні катастрофічні прояви!*

Вищезгадані стихійні лиха завдають величезної шкоди навколишньому середовищу й економіці країни. Запобігати їм можливо лише за умови раціонального використання природних ресурсів та створення загальної системи заходів, що перешкоджатимуть виникненню нових зон стихійних лих. Карстомоніторинг як основа оптимального освоєння закарстованих територій є одним із основних способів протикарстового захисту. Під ним розуміють, передусім, спостереження за станом території, умовами та основними факторами карстоутворення та небезпечними карстопроявами, збирання, аналіз, оброблення, зберігання та поширення даних, своєчасне запобігання (прогнозування) можливим критичним ситуаціям.

За результатами аналізу особливостей геологічного природного середовища смт. Солотвино визначено зони катастрофічних та потенційно небезпечних проявів карстовосуфозійних процесів у межах східної частини соляного штоку. До них належать площі шахтних полів рудників № 7, 8 та територія "Чорного Мочара", де спостерігаються утворення численних провалів та вертикальних і горизонтальних деформацій поверхні (зона зрушення породного масиву). Територія ускладнюється нерівномірними локальними осіданнями, засоленням, підтопленням, заболоченням, схиловою ерозією ґрунтів, зі значною непередбачуваною загрозою негативних їх проявів.

У роботі [Шехунова та ін., 2019] запропоновано інтегральну цифрову геологічну модель Солотвинської структури як інструменту оцінювання геоecологічного стану та визначення заходів із відновлення рівноваги в геологічному середовищі. Адаптивні методи виявлення змін довкілля за допомогою мультиспектральних космічних знімків Землі в поєднанні із класичними геодезичними методами спостережень допоможуть визначити місця вказаних критичних параметрів, за умови проявлення їх на поверхні Землі. З огляду на це, створення системи дистанційного моніторингу території Солотвино та прилеглих територій є першочерговим завданням сьогодення. Також потрібно звернути увагу на гідрогеологічні дослідження району Солотвино, зокрема річки Тиси.

Геодезичне забезпечення об'єкта дослідження

Для визначення й обґрунтування складу та обсягів топографо-геодезичних робіт, що проєк-

туються, визначення методів і технологій їх виконання, розрахунків точності та мінімізації собівартості робіт у районі вишукувань вивчено інформацію про забезпеченість території планово-висотними геодезичними мережами, топографічними картами і результатами цифрового аерознімання з робіт минулих років.

Вивчено їх кількісні та якісні параметри і характеристики на предмет відповідності нинішнім чинним нормативним вимогам та встановлення можливості й доцільності їх використання.

Збирання й аналіз матеріалів вишукувань минулих років здійснено в Державному картографічно-геодезичному фонді й у інших організаціях, що мають у своєму розпорядженні топографо-геодезичні матеріали. Оглядові відомості про топографо-геодезичні, картографічні та аерофотознімальні матеріали на район робіт подано в табл. 1.

Таблиця 1

Оглядові дані про основні картографічні, аеротопографічні та допоміжні матеріали, створені раніше на район робіт [Технічний звіт, 2010]

№ з/п	Вид матеріалів та характеристики	Виконавець робіт, рік виконання, інші дані	Місцезнаходження планів та карт, технічних звітів про виконані роботи тощо
А) Топографічні карти і плани та ортофотоплани			
1	Топографічні карти масштабів 1:10 000, 1:25 000 1:50 000, 1:100 000, 1:200 000 на папері та в растровому вигляді	Підприємства ГУГК СРСР, Укргеодезкартографії, Держгеокадастру. З 1960-х років до цього часу	1. Держкартгеофонд України 2. Підприємства – виконавці топографо-геодезичних робіт
2	Растрові копії карт масштабу 1:100 000	Можна знайти в інтернеті	1. Інтернет
3	Базова цифрова векторна карта України (комбінована із масштабів 1:100 000, 1:200 000)	Науково-дослідний інститут геодезії і картографії 2006–2007 рр.	1. Науково-дослідний інститут геодезії і картографії
4	Цифрові кадастрові карти та ортофотоплани з точністю масштабу 1:2 000, 1:10 000	Створені за Проєктом Світового банку	1. Держгеокадастр України та його територіальні органи 2. Публічна кадастрова карта України
5	Топографічні плани 1: 500, 1:2 000 і 1:5 000	Топографо-геодезичні спеціалізовані підприємства, проєктно-вишукувальні компанії та підприємці	1. Виконавці топографо-геодезичних робіт
6	Цифрові топографічні плани та ортофотоплани масштабу 1:2 000	ДП “Закарпатгеодезцентр”	1. ДП “Закарпатгеодезцентр”

Для відпрацювання методики виявлення змін ландшафтів та форм рельєфу під впливом геодинамічних процесів використано колекцію архівного аерофотознімання (рис. 3–7). Простий перегляд різновікових знімків тієї самої території свідчить, що навіть за такий короткий період зміни ландшафту можуть бути дуже істотними.

Після виявлення найнебезпечніших ділянок для запобігання можливим аваріям проведено локальний геодезичний моніторинг на об'єктах у межах смт. Солотвино, с. Ділове та с. Біла Церква (рис. 3–9) із використанням матеріалів цифрового аерознімання, топографічного знімання та супутникових знімків.

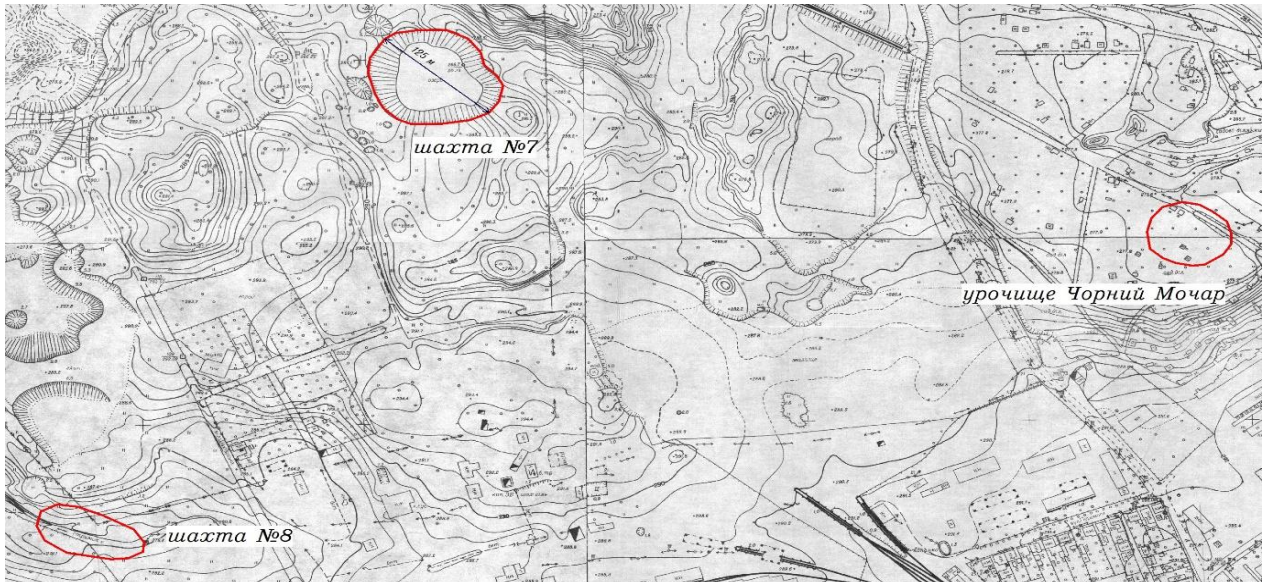


Рис. 3. Стереотопографічне знімання 1995 р.

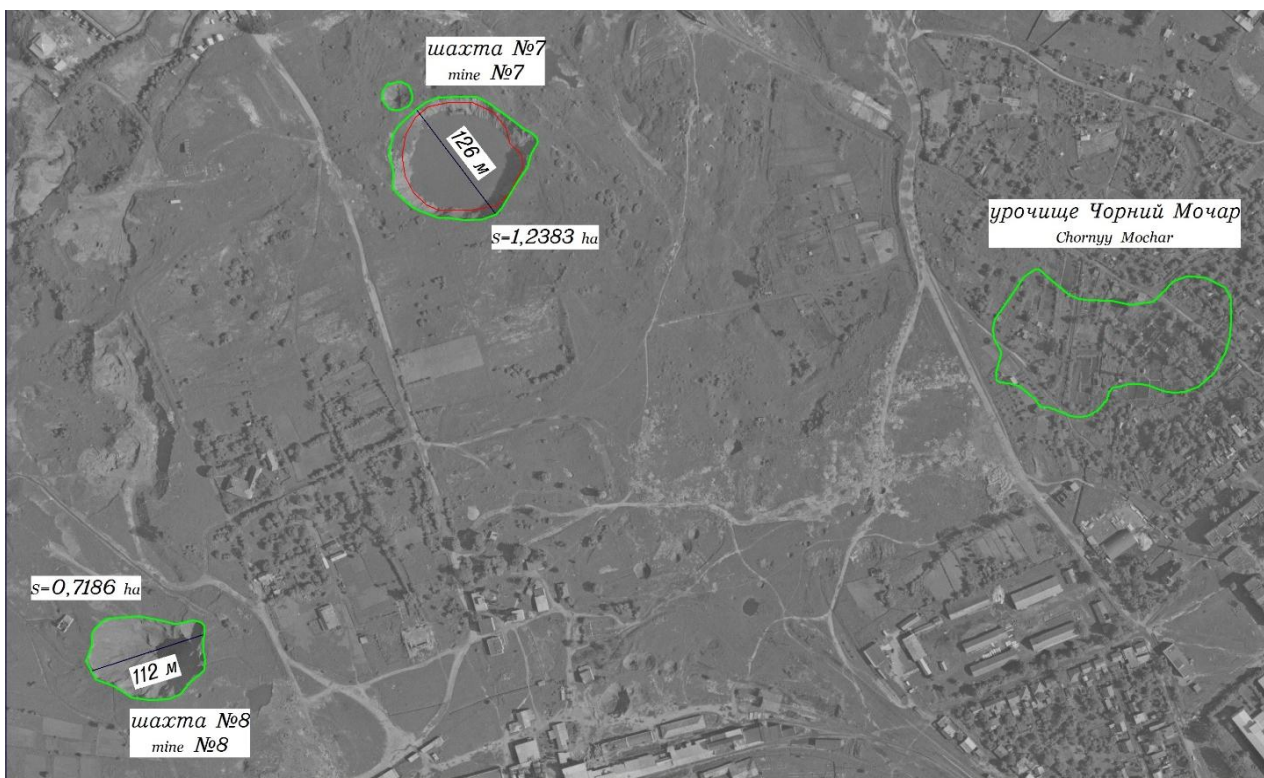


Рис. 4. Моніторинг карстів (матеріали цифрового аерознімання 2005 р.) [Технічний звіт, 2010]: об'єкти дослідження відображені червоним кольором, деформаційні зміщення зеленим



Рис. 5. Моніторинг деформацій (матеріали цифрового аерознімання 2010 р.)
[Проект Світового банку]



Рис. 6. Карстомоніторинг (супутникові знімки 2016 р.)



Рис. 7. Карстомоніторинг (матеріали топографічного знімання 2018 р. з архіву ДП “Закарпатгеодезцентр”)



а



б

Рис. 8. Моніторинг зсувних процесів на території с. Біла Церква [Технічний звіт, 2010]:
а – цифрове аерознімання 2005 р.; б – 2011 р.



Рис. 9. Моніторинг зсувних процесів на території с. Ділове (цифрове аерознімання 2011 р.)

Результати досліджень

Цифрове аерознімання є надзвичайно ефективним засобом досліджень геодинамічних процесів. Правильне його застосування забезпечує об'єктивність і достовірність результатів робіт; підвищує точність; уможливорює отримання такої інформації, яку неможливо одержати іншими методами (або можна, лише витративши значно більше коштів та часу); підвищує зрештою економічну ефективність робіт. У зв'язку із цим аерознімальні роботи все ширше застосовують майже у всіх видах геодинамічних досліджень, і роботи, виконані без їх використання, не можна вважати повноцінними.

Порівняно із пілотованими літальними апаратами, для БПЛА характерні: вища доступність, простота використання, менші витрати на обладнання та операції, висока мобільність та ефективні збирання, оброблення та оновлення даних.

Проте використання БПЛА для моніторингу часто обмежене вимогами до точності [Stupar et al., 2020]. Тому перевагами БПЛА є можливість отримувати великі набори даних, а також побічні продукти, такі як ЦМР та, зрозуміло, людині не доводиться перебувати біля небезпечних зон спостереження.

Для визначення динаміки зсувів, карсту цифрове аерознімання необхідно повторити кілька разів через певні інтервали.

На досліджуваних територіях аерознімальні роботи виконували у два етапи: навесні 2020 та восени 2021 р. За результатами аерознімання створено: ортофотоплани та тривимірні цифрові моделі рельєфу для прогнозування карстів та зміщень. Цифрове аерознімання виконано відповідно до вимог нормативних документів [Вимоги, 2014, Інструкція, 1998, Інструкція, 2000,

Класифікатор інформації, 2010, Основні положення, 1994, Умовні знаки, 2000].

На першому етапі знімання здійснено за допомогою БПЛА – Гексакоптер Tarot 680PRO [Tarot 680 PRO, 2020].

Сенсор фотокамери Sony A 6000; 24.3 МП. Розділення в матриці 6000×4000 пікселів. Фокусна = 16 мм. Розмір кадру 294 × 195 мм;

- масштаб цифрового аерознімання 1:7000;
- роздільна здатність аерофотознімків 5 см на місцевості;

- цифрове аерознімання виконано з висоти 110 м;

- повздовжнє перекриття 70 %, поперечне 60 %;
- ортофотоплан одержано з роздільною здатністю 2,68 см/пікс.

На другому етапі аерофотознімальні роботи виконано за допомогою БПЛА – Autel EVO II Pro RTK [Autel EVO II Pro RTK, 2021]:

- сенсор фотокамери 1" Autel Robotics XT705; 20.0 МП. Розділення в матриці 5472×3648 пікселів. Фокусна = 11 мм;

- масштаб цифрового аерознімання 1:10000;
- роздільна здатність аерофотознімків 5 см на місцевості;

- цифрове аерознімання виконувалось з висоти 110 м;

- повздовжнє перекриття 70 %, поперечне 60 %;
- у результаті виконаних робіт одержано 1614 знімків;

- ортофотоплан одержано з роздільною здатністю 2,72 см/пікс.

За допомогою фотограмметричного програмного забезпечення виконано самокалібрування. Початкові та оптимізовані параметри неметричної аерофотокамери наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Результати самокалібрування аерофотокамери Autel Robotics XT705

	Розмір пікселя матриці, мкм	Розмір сенсора (x, y), пікс	F, мм	C0x, пікс	C0y, пікс	R1	R2	R3	T1	T2
Початкові значення	5472×3648	416,667×416,667	11	0	0	0	0	0	0	0
Відкалібровані значення	5472×3648	416,667×416,667	10,6	0,026	0,022	3,2×10 ⁻⁵	1,3×10 ⁻⁵	1,7×10 ⁻⁵	2,1×10 ⁻⁶	1,6×10 ⁻⁶

Обсяги цифрового аерознімання на об'єктах
Об'єкт Біла Церква:

- и площа цифрового аерознімання 13 га;
- и застосовано розріджену схему розташування планово-висотних розпізнавальних знаків, які розміщені рівномірно по площі й периметру об'єкта. Загалом визначено координати *семи* розпізнавальних знаків.

Об'єкт Солотвино:

- и площа цифрового аерознімання 200 га;
- и знімання виконано з трьох польотних проєктів тривалістю 25 хв кожен;
- и застосовано розріджену схему розміщення планово-висотних розпізнавальних знаків, які розміщені рівномірно по площі й периметру об'єкта. Загалом визначено координати **46** розпізнавальних знаків.

Об'єкт Ділове:

- и площа цифрового аерознімання 16 га;
- и застосовано розріджену схему розміщення планово-висотних розпізнавальних знаків, які розміщені рівномірно по площі й периметру об'єкта. Загалом визначено координати *семи* розпізнавальних знаків.

Для розпізнавальних знаків вибрано контурні точки, які розпізнаються на аерознімку місцевості з точністю не менше ніж 0,1 мм у масштабі створюваного плану [Інструкція, 1998, Основні положення, 1994]. Точки знімальної мережі закріплювали на місцевості центрами, що забезпечують збереження їх на час знімальних робіт – штир, трубка, дюбель, залізничний костиль, дерев'яний кілок або чітко означувані предмети ситуації тощо.

Вводячи в мережу пункти попередніх робіт, їм зберігали раніше присвоєні номери.

Математичне опрацювання геодезичних GPS-вимірювань виконано за допомогою програмного забезпечення Trimble Geomatics Office із приведенням ліній на рівень моря і редукуванням на площину проєкції Гаусса – Крюгера.

Точність створеної знімальної GPS мережі відповідає вимогам чинних нормативних технічних документів [Інструкція, 1998, Інструкція, 2000]. Граничні похибки відносно пунктів Державної геодезичної мережі та геодезичних мереж згущення не перевищують на відкритих

місцях та на забудованій території 0,2 мм у масштабі створюваного плану та 0,3 мм у місцях, закритих деревами або чагарниками.

Фотограмметричні та стереотопографічні роботи

Після отримання аерознімків та результатів планово-висотної прив'язки аерознімків здійснено фотограмметричне згущення.

Фотограмметричні роботи виконано за допомогою програмного Agisoft Photoscan. Вихідними даними для виконання робіт були матеріали планово-висотної підготовки аерознімків – координати і відмітки планово-висотних розпізнавальних знаків.

Фотограмметричні роботи полягали у визначенні елементів внутрішнього орієнтування стереопар та зовнішнього орієнтування відносно заданої системи координат кожного пікселя аерофотознімків.

Аерознімки відкориговано за тоном та кольорами задля досягнення RGB-кольорів, максимально наближених до реальних на місцевості.

Після фотограмметричного оброблення виконано контроль якості отриманих результатів та створено цифрові моделі рельєфу прийомками DEM та TIN.

Для визначення точності планових і висотних координат точок місцевості із використанням оптико-електронних камер використано [Burshtynska et al., 2020]:

$$m_{x,y} = (H / f) \times P_m, \quad (1)$$

$$m_h = (H / B) \times P_m, \quad (2)$$

де H – висота знімання; f – фокусна віддаль камери; P_m – розмір пікселя на місцевості; B – базис знімання.

Точність визначення планових координат розраховують згідно із формулою (1)

$$m_x = m_y = 0.0055 \times (110 / 11) = 0.055 \text{ м} = 5,5 \text{ см}.$$

Перекриття знімків вибрано 70 %. Тоді базис на знімку становить:

$$b = 13,3 \times (100 - 70) / 100 = 3,99 \text{ мм}.$$

Похибка визначення позначок висот для вибраного базису (2) становить:

$$m_h = 110 / 3,99 \times 0,0055 = 0,15 \text{ м}.$$

Створення цифрових ортофотопланів

Ортофотоплани в масштабі 1:1 000 виготовлено за растровими зображеннями аерознімків з урахуванням створеної цифрової моделі рельєфу. Цифрову модель рельєфу створювали, визначивши відмітки вузлів регулярної сітки в стереорежимі з кроком 10,0 м та висоти її вузлів у інтерактивному стереорежимі. На другому етапі в ручному стереорежимі будували структурні лінії в місцях різкого перепаду висот (підпірні стінки, укоси, яри тощо) та в характерних місцях зі складними формами рельєфу, де недостатня щільність регулярної сітки – 10,0 м.

Під час трансформування використовували центральні частини знімків, оскільки на них найменші перспективне спотворення та похибка за рельєф. Мозаїкування усіх фрагментів ортофотопланів виконано за допомогою

програми Agisoft Photoscan. Точність створених ортофотопланів перевіряли за контрольними точками та лініями “зшивання” частин ортофотопланів. Координати контрольних точок визначали під час виконання планово-висотної прив’язки GPS-приймачем Trimble R8 у режимі RTK від мережі базових станцій ZAKPOS. Точність прив’язки до контрольних точок становить:

$$m_x = 4.4 \text{ см} \quad m_y = 3.4 \text{ см} \quad m_h = 0.135 \text{ м}.$$

Крім цього, для контролю точності ортофотопланів використано пункти наявної геодезичної мережі.

У результаті аерознімальних робіт за допомогою БПЛА одержано ортофотоплани на об’єкті Солотвино, Ділове та Біла Церква, створено 3D-схеми карстів та топографічні плани масштабу 1:500. Результати наведено на рис. 10–18.

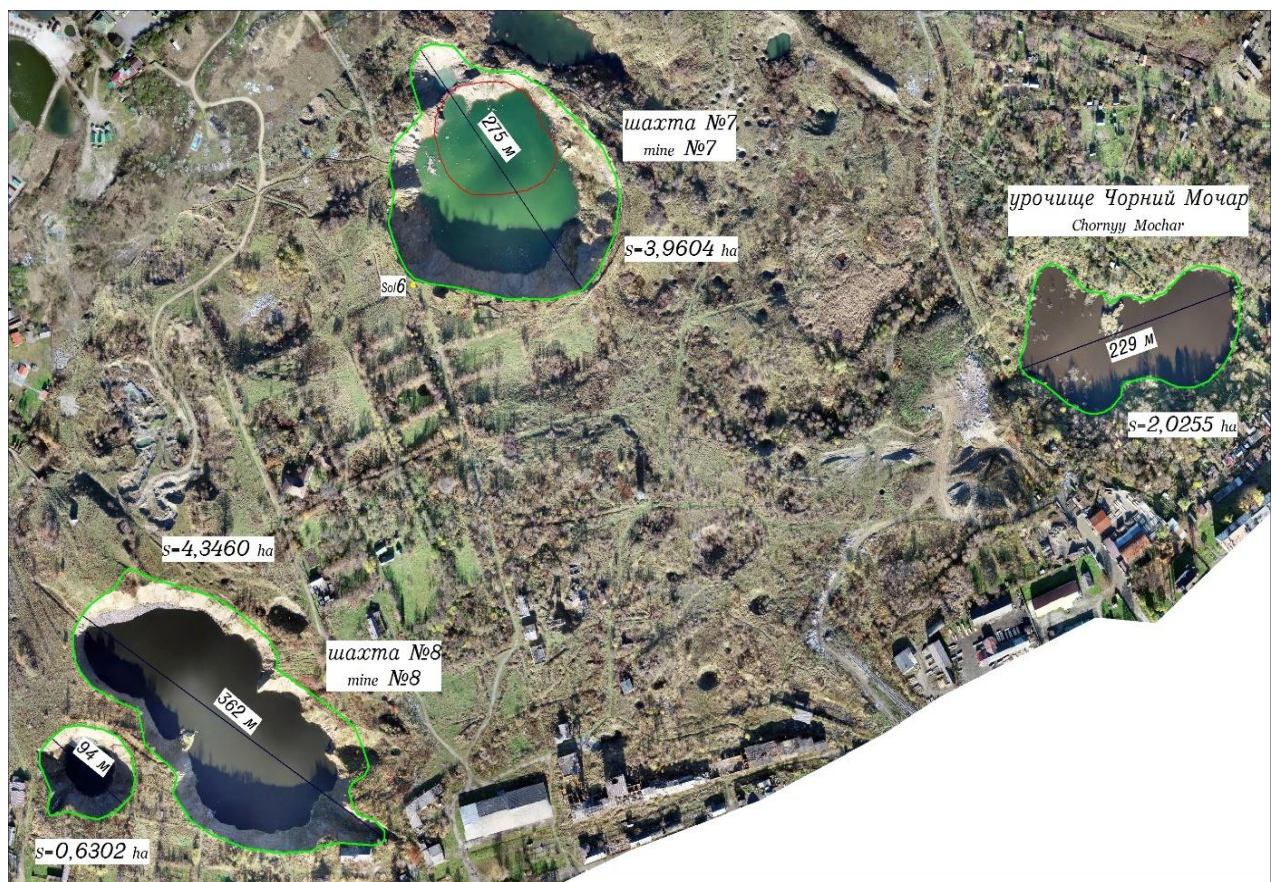


Рис. 10. Моніторинг зміщень на об’єкті Солотвино (матеріали цифрового аерознімання 2020 р.)

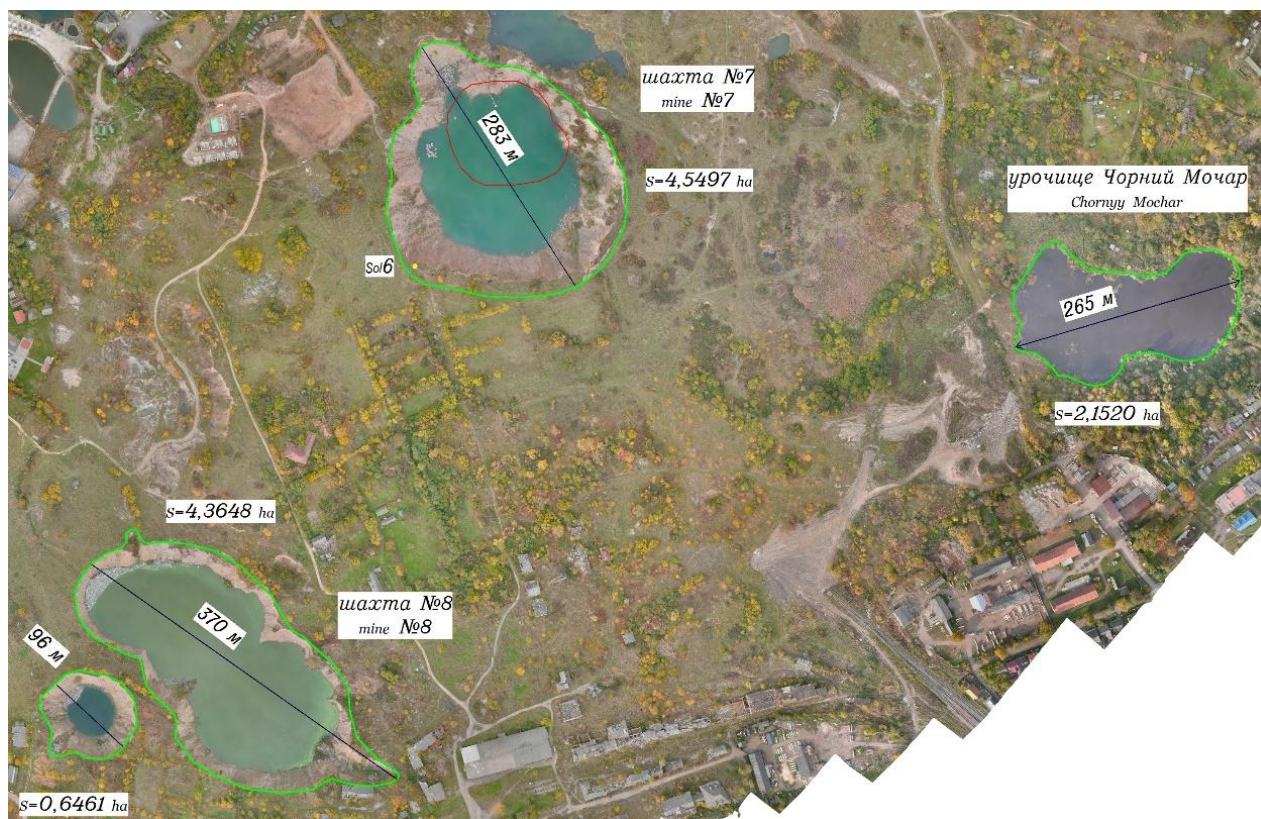


Рис. 11. Моніторинг зміщень на об'єкті Солотвино
(за матеріалами цифрового аерознімання 2021 р.)

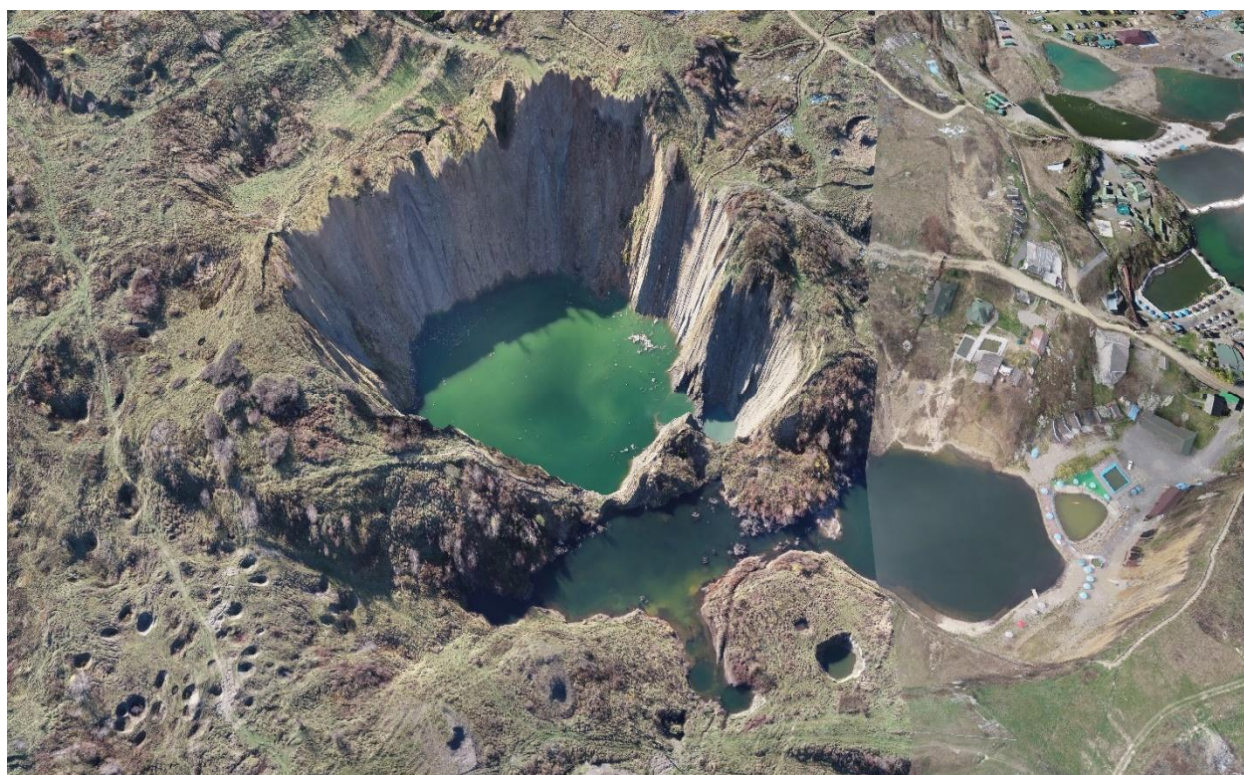


Рис. 12. 3D-схема карстів: карст 1: шахта № 7



Рис. 13. 3D-схема карстів: карст 2: Чорний Мочар



Рис. 14. 3D-схема карстів: карст 3: шахта № 8

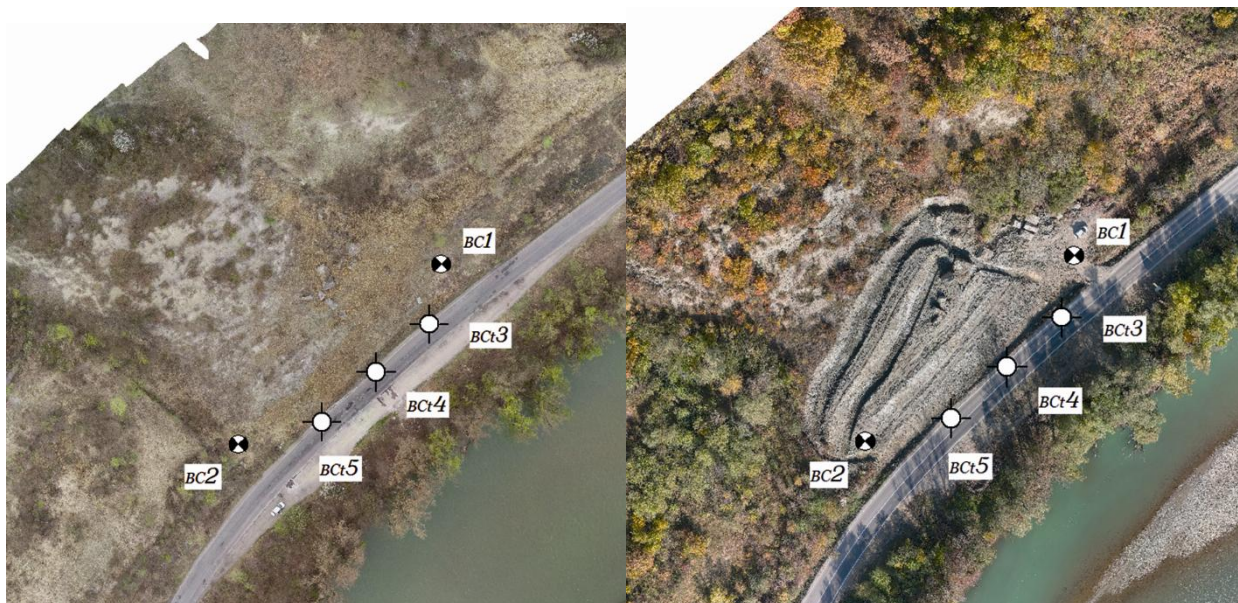


Рис. 15. Деформаційний моніторинг (цифрове аерознімання 2020–2021 рр.), Біла Церква

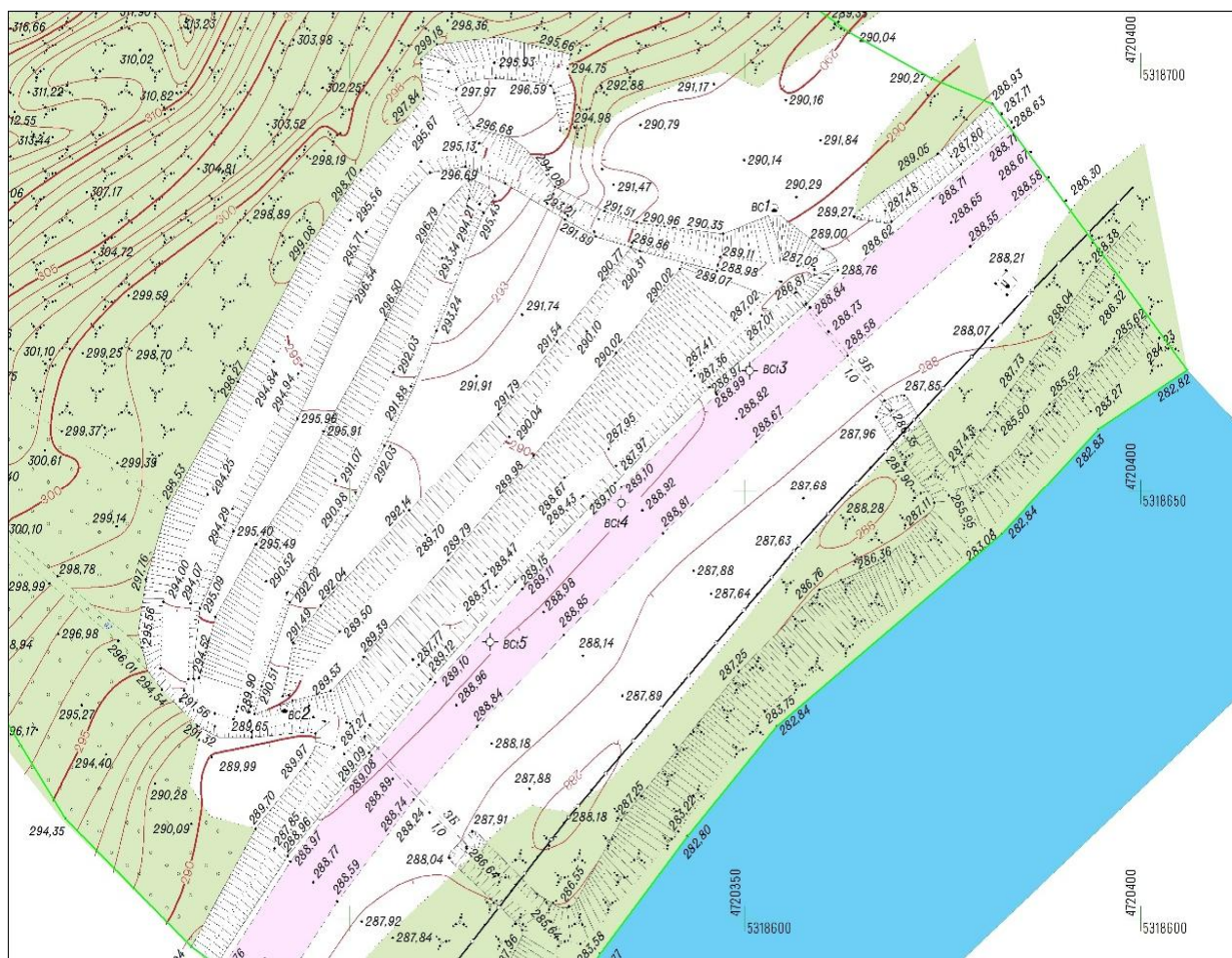


Рис. 16. Топографічне знімання 1:500, Біла Церква



Рис. 17. Деформаційний моніторинг (цифрове аерознімання 2020–2021 рр.), Ділове

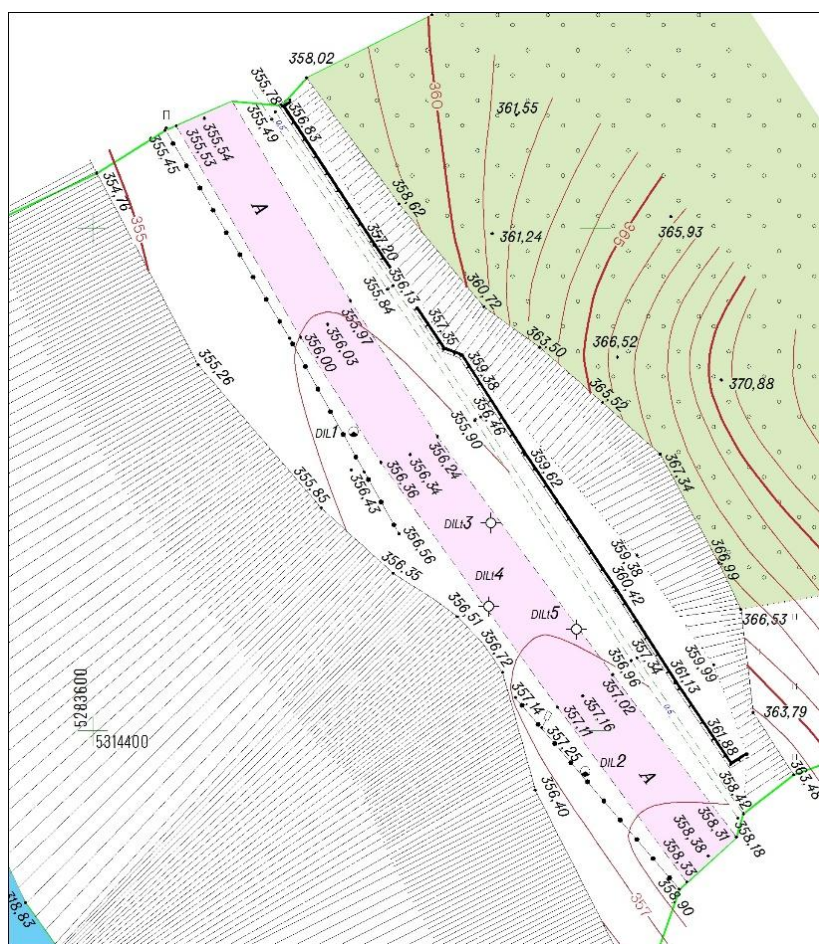


Рис.18. Топографічне знімання 1: 500, Ділове

Наукова новизна

Унаслідок необхідності оновлення інформації про стан сучасних карстоутворень та ділянок із екзогенними процесами в Солотвино

та Біла Церква Тячівського району та с. Ділове Рахівського району Закарпатської області виникла необхідність у виконанні моніторингових робіт.

Ї Розроблено та апробовано технологію топографо-геодезичних робіт із застосуванням БПЛА і GPS-вимірювань у гірських районах.

Ї Результати аерознімання використано з метою візуалізації об'єктів дослідження та донесення інформації про деформаційні процеси до органів місцевого самоврядування. Для природного чи техногенного процесів (зміщення, зсуви, карсти) потрібно розробити індивідуальні підходи із використанням БПЛА. Подібні моніторингові дослідження виводять на новий рівень вивчення природного середовища і з кожним роком підвищуватимуть наукову цінність отриманих матеріалів. Завдяки масовому використанню знімань з БПЛА формується банк даних, який неможливо створити іншими методами.

Практичне значення одержаних результатів полягає у доведенні можливості створення однорідної планово-висотної основи за даними супутникових вимірювань та відповідних модифікацій сучасних моделей у єдиній державній системі координат. Розроблено методики комплексного визначення рухів на екзогенних та техногенних ділянках місцевості в гірських районах із використанням новітніх технологій.

У результаті на території об'єктів Солотвино, Біла Церква та Ділове методами GPS та цифрового аерознімання створено нову високоточну каркасну геодезичну мережу.

Висновки

У результаті геодезичних досліджень на зсувонебезпечних ділянках та на закарстованих територіях отримано такі результати:

Ø Здійснено аналіз картографічних матеріалів та матеріалів цифрового аерознімання за 1995–2018 рр. для встановлення геодинамічних процесів шахт № 7, 8, розташованих на території смт. Солотвино.

Ø Виконано аерознімання за допомогою БПЛА, отримано сучасні цифрові ортофотоплани та цифрові топографічні плани масштабу 1:500 із перерізом рельєфу через 25 см.

Наведені дані свідчать про сучасний критичний та катастрофічний стан геологічного середовища в межах Солотвинського родовища кам'яної

солі, що пов'язано насамперед із інтенсивним розвитком соляного карсту останніми роками.

На об'єктах с. Ділове та Біла Церква зміщення незначні. Нині ведуться роботи зі стабілізації зсувів.

Надалі заплановано здійснення високоточного нівелювання у межах досліджуваних територій, що підтвердить одержані результати. Дослідження висвітлено в наступній публікації.

Публікацію здійснено у межах виконання міжнародного гранту HUSKROUA/1702/8.1/0065 – Розширення операційної системи “Космічна аварійна система” в напрямі моніторингу небезпечних природних та техногенних геопроцесів у прикордонному регіоні HU-SK-RO-UA.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Вимоги до технічного і технологічного забезпечення виконавців топографо-геодезичних і картографічних робіт. Мінагропрод. 2014-02-11 N 65
- Дяків В. О. Закономірності розвитку техногенно активізованого соляного карсту в процесі затоплення шахт № 8 та № 9 Солотвинського солерудника. *Географія*. 2012. № 9. <http://95.217.214.133/handle/123456789/220>
- Інструкція з топографічного знімання у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500. 1998-04-08 № 56.
- Інструкція про порядок контролю і приймання топографо-геодезичних та картографічних робіт. *Укргеодезкартографія*, № 19 від 17.02.2000 р. https://gki.com.ua/files/uploads/documents/Norms/Ukrgeodesykart_norms/19.pdf
- Інформаційний щорічник щодо активізації небезпечних екзогенних геологічних процесів за даними моніторингу ЕГП. Київ: Державна служба геології та надр України, Державне науково-виробниче підприємство “Державний інформаційний геологічний фонд України”, 2020. 104 с. <https://geonews.com.ua/news/detail/informacijnijschorichnik-schodo-aktivizacii-nebezpechnih-52877>
- Калинич І. В., Каблак Н. І., Скаканді С. В. Динаміка розвитку зсувних процесів на території Закарпатської області Київ: *Містобудування та територіальне планування*. 2017. № 64. С. 535–543. <https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/handle/lib/17054>
- Класифікатор інформації, яка відображається на цифрових топографічних планах масштабів 1: 500, 1:1 000, 1:2 000 і 1:5 000. *Укргеодезкартографія*,

2010. https://gki.com.ua/files/uploads/documents/Norms/Ukrgeodesykart_norms/25.pdf
- Основні положення створення топографічних планів масштабів 1:5 000, 1:2 000, 1:1 000 та 1: 500. *Укргеодезкартографія*. 1994-01-23 № 3. https://gki.com.ua/files/uploads/documents/Norms/Ukrgeodesykart_norms/3_1994.pdf
- Проект Світового банку “Видача державних актів на право власності на землю у сільській місцевості та розвиток системи кадастру”, 2010. <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0240675-09#Text>
- Технічний звіт про виконання робіт з топографічного знімання, оновлення та підготовки до видання карт масштабу 1:10 000, ДП “Закарпатгеодезцентр”, 2010. https://gki.com.ua/normativni_dokumenti_tsentral_nogo_organu_vikonavcho_topografich
- Умовні знаки для топографічних планів масштабів 1:5 000, 1:2 000, 1:1 000, 1:500. 2000-02-28. https://gki.com.ua/files/uploads/documents/Norms/Ukrgeodesykart_norms/umovni_znaky_500-5000.pdf
- Шехунова С. Б., Алексєєнкова М. В., Стадніченко С. М. Закономірності розвитку природних та природно-техногенних небезпечних геологічних процесів та території містечка Солотвино (Закарпаття, Україна). *Збірник наукових праць ІГН НАН України*. 2019. Том 12. С. 70–83. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2019.185745>
- Autel EVO II Pro RTK Rugged Bundle (2021) <https://flytechnology.ua/kvadrokopter-autel-evo-ii-pro-rtk-rugged-bundle>
- Burshtynska, Hr., Babushka, A., & Galochkin, M. (2020). Modeling of hydrological processes using ARCGIS GIS and HEC-RAS module. *Geodesy, cartography and aerial photography*, 91, 28–40. <https://doi.org/10.23939/istcgcap2020.91.028>
- Stupar, D., Rošer, J., Vulić, M. (2020). Investigation of unmanned aerial vehicles-based photogrammetry for large mine subsidence monitoring,” *Minerals*, 10 (2). <https://doi.org/10.3390/min10020196>
- Tarot 680 PRO (2020). <https://www.robotshop.com/en/tarot-680-pro-folding-hexacopter-frame.html>

Ivan KALYNYCH¹, Mariya NYCHVYD², Ivan PRODANETS³, Nataliya KABLAK⁴, Yaroslav VASH⁵

¹ Department of Geodesy, Land Management and Geoinformatics, Uzhhorod National University, 14, Universytetska Str., Uzhgorod, 88000, Ukraine, e-mail: ivan.kalynych@uzhnu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-5213-3417>

² Department of Geodesy, Land Management and Geoinformatics, Uzhhorod National University, 14, Universytetska Str., Uzhgorod, 88000, Ukraine, e-mail: mariya.nychvyd@uzhnu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-5661-8799>

³ Transcarpathian regional branch of SE “UkrSAGE”, 39, Hrushevskoho Srt., Mukachevo, 89600, Ukraine, e-mail: geodezcentre@gmail.com

⁴ Department of Urban Construction and Economy, Uzhhorod National University, 14, Universytetska Str., Uzhgorod, 88000, Ukraine, e-mail: nataliya.kablak@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2907-931X>

⁵ Department of Cadastre of Territories, Lviv Polytechnic National University, 12, Bandery Str., Lviv, 79013, Ukraine, e-mail: yaroslav.i.vash@lpnu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-7570-0437>

MONITORING OF GEODYNAMIC PROCESSES IN THE TYSA RIVER BASIN USING AUTEL EVO II PRO RTK UAV

The aim of this work. This article is devoted to the study of geodynamic processes in the Tysza River basin within the Transcarpathian region with an analysis of geodetic observations obtained over the past decade. *Method.* Karst monitoring began with the identification of the most dangerous areas of the earth's surface that are subject to vertical displacements. After the detection of the most dangerous areas the local geodetic monitoring was carried out at facilities within the urban settlement to prevent possible accidents: Solotvyno, Dilove and Bila Tserkva. A collection of archival aerial photography was also used to develop a methodology for identifying changes in landscapes and landforms under the influence of geodynamic processes. *Results.* UAVs were used to remove karsts. On the basis of digital aerial photography data were created: orthophotos and digital terrain models. Digital aerial photography was carried out in accordance with the requirements of regulatory documents. To determine the dynamics of landslides and karst the digital aerial photography must be repeated several times at certain intervals. Aerial photography work was carried out in two stages in 2020 and 2021 Contour points were selected for identification marks. They are recognized on aerial

photography and the terrain with an accuracy of at least 0.1 mm on the scale of the created plan. Mathematical processing of geodetic GPS measurements was performed using Trimble Geomatics Office software. After photogrammetric processing, the quality control of the obtained results was performed and digital surface models using DEM and TIN methods. Orthophotomaps on a scale of 1:1000 were made from raster images of aerial photographs, taking into account the created digital terrain model. There is a need for monitoring work to update information on the state of modern karst formations and areas with exogenous processes in Solotvyno and Bila Tserkva, Tyachiv district and the village Dilove, Rakhiv district, Transcarpathian region. The technology of topographic and geodetic works with the use of UAVs and GPS measurements in mountainous areas has been developed and tested. The results of aerial photography were used to visualize the study objects and to convey information regarding the deformation processes to local governments. For processes of natural or man-made nature (displacement, landslides, karst) requires the development of individual approaches to the use of UAVs. With the mass use of UAV images, a data bank is formed, which cannot be obtained by other methods. The study made it possible to create the method of complex determination of movements in exogenous and technogenic areas in mountainous areas with the use of the latest technologies. It allows quick establishing a plan-altitude basis of the required accuracy in the reference coordinate system in solving a number of applied geodesy problems using satellite technologies and UAVs for observations by objects.

Key words: digital aerial photogrammetry; digital surface models; deformations monitoring; unmanned aerial vehicle; orthophotoplan.

Надійшла 28.04.2022 р.