

Інструментальне дослідження та картографування озера Синевир: інтеграція методів дистанційного зондування для геоecологічного моніторингу водно-болотного угіддя

Іван Калинич¹

к. техн. н., доцент, декан географічного факультету,

¹ Ужгородський національний університет, м. Ужгород, Україна

e-mail: ivan.kalynych@uzhnu.edu.ua,  <https://orcid.org/0000-0002-5213-3417>;

Микола Карабінюк¹

к. геогр. н, доцент, кафедра фізичної географії та раціонального природокористування,

e-mail: mykola.karabiniuk@uzhnu.edu.ua,  <https://orcid.org/0000-0001-9852-7692>;

Марія Ничвид¹

ст. викладач кафедри геодезії, землеустрою та геоінформатики,

e-mail: mariya.nychvyd@uzhnu.edu.ua,  <https://orcid.org/0000-0001-5661-8799>;

Іван Проданець²

директор, ² Закарпатська регіональна філія ДП «УкрДАГП»,

e-mail: geodezcentre@gmail.com,  <https://orcid.org/0009-0009-6377-4023>;

Олексій Примак³

директор, ³ Приватне підприємство «Геодезична Інжинірингова Агенція»,

e-mail: prymak.alex@gmail.com,  <https://orcid.org/0009-0009-4605-6468>;

Василь Плиска⁴

зав. лабораторії опрацювання спостережень ГНСС,

⁴ Центр управління Української постійно діючої мережі ГНСС,

e-mail: vasplyska@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0003-1217-6022>

Дослідження присвячене створенню високоточної топографічної основи для озера Синевир – одного з найважливіших водно-болотних угідь Карпатського регіону міжнародного значення. З огляду на зростаючий вплив антропогенних факторів і кліматичних змін, актуальним є впровадження довготривалого геоecологічного моніторингу стану озерної екосистеми. У роботі реалізовано інтеграцію методів дистанційного зондування земної поверхні та гідроакустичного батиметричного знімання для формування комплексної картографічної бази. Методологія включає використання безпілотних літальних апаратів із системою LiDAR, фотограмметричну обробку зображень високої роздільної здатності, а також ехолотне сканування дна озера з GNSS-прив'язкою. Обробка даних здійснювалася у спеціалізованому програмному забезпеченні (Terrasolid, Agisoft Metashape, Trimble HYDROpro, Digitals), що дозволило створити цифрову модель місцевості, ортофотоплан, TIN-модель дна і топографічний план. Уперше для озера Синевир проведено повний цикл високоточних інструментальних картографічних робіт, у результаті яких було побудовано ортофотоплан із роздільною здатністю 5,9 см/пікс, отримано батиметричні дані з точністю $\pm 0,1$ м, визначено максимальну глибину озера (19,98 м) та розроблено 3D-модель дна з гіпсометричними профілями. Ключовим результатом стало створення топографічного плану в масштабі 1:1 000, який може слугувати базою для подальших наукових досліджень і моніторингових програм. Наукова новизна полягає у першому застосуванні комплексного підходу до інструментального картографування гірського озера із поєднанням лідарного знімання, аерофотозйомки з БПЛА та батиметричного сканування. Це забезпечило отримання нової просторової інформації щодо морфології озера та створення багатокомпонентної системи геопросторових даних. Практична значущість дослідження полягає в адаптивності запропонованої методики до інших природоохоронних об'єктів Карпат, що робить її цінною для транснаціональних екологічних ініціатив та інтегрованого управління територіями з особливим статусом охорони.

Ключові слова: озеро Синевир, Українські Карпати, водно-болотне угіддя, батиметрія, дистанційне зондування, топографічне знімання, геоecологічний моніторинг.

Як цитувати: Калинич Іван, Карабінюк Микола, Ничвид Марія, Проданець Іван, Примак Олексій, Плиска Василь (2025). Інструментальне дослідження та картографування озера Синевир: інтеграція методів дистанційного зондування для геоecологічного моніторингу водно-болотного угіддя. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія»*, (63), 221-233. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-17>

In cites: Kalynych Ivan, Karabiniuk Mykola, Nychvyd Mariia, Prodanets Ivan, Prymak Oleksii, Plyska Vasyi (2025). Instrumental Study and Mapping of Lake Synevyr: Remote Sensing Integration for Wetland Geocological Monitoring. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (63), 221-233. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-17> [in Ukrainian]

Постановка проблеми. Зростання антропогенного впливу на довкілля та зміни ландшафтно-ї структури гірської системи Карпат в умовах інтенсивних змін клімату вимагають застосування

комплексних підходів та сучасних методів у вивченні цінних об'єктів навколишнього середовища з метою їх збереження. Також прояви глобальних змін та аридизація кліматичних умов в

Українських Карпатах впливають на особливості функціонування, процеси циркуляції та вологообмін в геокомплексах гірської системи [1, 2]. У результаті найбільшої загрози зникнення на сьогодні зазнають унікальні геокомплекси високогірного ландшафтного ярусу із характерним поширенням реліктових аркто-альпійських видів рослин та водно-болотні угіддя (ВБУ), які є цінними елементами природного середовища. Власливості та функціонування останніх тісно залежить від генезису гідрологічного об'єкту й сучасних гідро-кліматичних умов території їх розташування [3]. Водно-болотні угіддя та оточуючі їх геокомплекси мають важливе значення для формування і стабілізації гідрологічного балансу в Українських Карпатах, а також відіграють ключову роль у збереженні біорізноманіття та виконують важливі екосистемні функції – від очищення води і збереження вологості до регулювання мікроклімату [4, 5]. Із всього різноманіття водно-болотних угідь Українських Карпат особливе місце займають озера, збереження яких на сьогодні належить до пріоритетних завдань тут природоохоронної діяльності.

До унікальних водно-болотних угідь міжнародного значення Українських Карпат належить озеро Синевир, що знаходиться у верхів'ї басейну річки Теребля в межах Національного природного парку «Синевир» [6]. Воно є найбільшим озером української частини гірської системи із загальним об'ємом водної маси в діапазоні 350-460 тис. м³ і вирізняється своєрідними генетично-морфологічними рисами. Водно-болотне угіддя у складі з озером Синевир займає площу 29 га і знаходиться на території Синевирської територіальної громади Хустського району Закарпатської області. Територія угіддя також входить до буферної зони об'єкта Всесвітньої природної спадщини ЮНЕСКО «Букові праліси і давні ліси Карпат та інших регіонів Європи» [6]. Зважаючи на естетичну цінність, високе ландшафтне та біологічне різноманіття території, цікаві історико-культурні риси місцевості та інші фактори, озеро Синевир є одним із основних природних рекреаційно-туристичних об'єктів Закарпатської області та Українських Карпат загалом. В умовах прогресивного рекреаційного навантаження на озеро Синевир на фоні підтверджених кліматичних змін, порушень в гідрологічному режимі річок та загальної інтенсифікації процесів деградації водно-болотних угідь в Українських Карпатах на сьогодні актуальним є впровадження комплексного геоекологічного моніторингу водно-болотного угіддя на основі новітніх принципів і методів та з використанням сучасних технологій.

Для розробки ефективної програми моніто-

рингу та реалізації комплексного наукового дослідження озера Синевир першочерговим завданням є розробка якісного крупномасштабного картографічного матеріалу із можливістю подальшої цифрової обробки геоданих у спеціалізованому програмному середовищі. Розробка вихідної картографічної основи є необхідністю для подальшого ландшафтного картографування, дослідження морфологічної структури та морфометричного аналізу території озерно-басейнової системи, оцінки розвитку ерозійно-аккумулятивних процесів у водозборі озера Синевир та ін. Найефективнішим способом картографування озера Синевир та розробки відповідної топографічної основи із необхідною для виконання подальших досліджень точністю та деталізацією є застосування методів дистанційного зондування у поєднанні з батиметрією озерного ложа.

Метою дослідження є розробка топографічного плану дна озера Синевир та прилеглої території на основі результатів власних інструментальних досліджень методами дистанційного зондування за допомогою технології LiDAR у поєднанні з гідроакустичним методом батиметричного знімання озерного ложа. Також обґрунтувати методичні особливості та технічні аспекти картографування озера Синевир в своєрідних умовах гірської місцевості Українських Карпат з метою підготовки картографічного матеріалу та передумов для організації довготривалого геоекологічного моніторингу водно-болотного угіддя міжнародного значення у Карпатському регіоні.

Аналіз останніх джерел та публікацій.

Аналіз опублікованих наукових праць свідчить, що детальні географічні дослідження та картографування озер Українських Карпат розпочалися в другій половині ХХ ст. Основна увага науковців тоді була присвячена вивченню морфологічних особливостей та картографуванню головно реліктових високогірних озер льодовикового походження гірських масивів Чорногора та Свидовець, які безпосередньо зазнали впливу плейстоценових зледенінь. Наприклад, у процесі дослідження льодовикових озер Чорногори у 1964 році відомий дослідник гірських ландшафтів Українських Карпат Г. Міллер завершив батиметричні знімання та уклав відповідні батиметричні карти для озер Бребенескул (переріз ізобат через 0,5 м) та Верхнє Озеро урочища Озірне (переріз ізобат через 4 м) [7].

Подальші дослідження особливостей озер Українських Карпат головно стосувалися аналізу територіального поширення, особливостей геоморфологічної будови та структури сучасних донних відкладів [8]. На особливу увагу заслуговують результати гідробіологічного дослідження екосистем лентичних водойм під керівництвом Т.

Микітчака, які головню присвячені озерам та озерцям гірського масиву Чорногора [3, 9]. Ці дослідження супроводжувалися розробкою картографічних матеріалів і визначенням координат розміщення озер та озерцям в Чорногорі, а також було виконано картографування приозерної території та обрисів акваторії високогірних озер, заростей на дослідних ділянках осоки, чагарників тощо [3, 9].

Батиметричні дослідження озер Українських Карпат продовжені у 2010-х роках з метою вивчення геоморфологічних та морфометричних особливостей озерних улоговин на території Чорногірського та Свидовецького масивів [10]. У результаті було реалізовано батиметрію озер Апшинець, Драгобратське (Верхнє і Нижнє), Ворожеське (Верхнє і Нижнє) та Герешаска (Догяска), а також проаналізовано особливості поширення гравітаційних процесів (зсуви, обвали, осипи) в межах водозбірних басейнів (карів) [10]. Пізніше у результаті зростання антропогенного впливу на водно-болотні угіддя Українських Карпат головню з боку рекреаційно-туристичної діяльності впродовж останнього десятиліття зростає увага науковців (О. Антошика [11], М. Карабінюка та ін. [12] тощо) до проблем антропопресії на озера та оцінки ступеня перетвореності геокомплексів приозерних територій, що супроводжується відповідним картографуванням.

Таким чином, попередні дослідження і картографування озер та водно-болотних угідь Українських Карпат головню ґрунтувалися на основі батиметричних вимірювань та натурних обстежень прибережної території, що супроводжувалося укладанням карт. Використання спеціалізованого обладнання у процесі картографування озер гірської системи у минулому було суттєво обмежене без застосування інструментів дистанційного зондування чи гідроакустичного батиметричного знімання. Сучасне картографування водно-болотних угідь потребує використання високоточних геопросторових даних через їхню динамічну природу та сезонні зміни, отримання яких можливе виключно на основі використання новітніх методів дистанційного зондування та завдяки використанню професійного спеціалізованого обладнання наземного знімання [13]. Дистанційне зондування дозволяє ефективно визначити межі акваторії озер на основі фактичного рівня води, картографувати морфологічні особливості прибережної території та реальну просторову структуру рослинного покриву, об'єкти довкілля тощо. Застосування гідроакустичних методів для батиметричного знімання і картографування озерного ложа дозволяє детально дослідити глибини, форму та нерівності дна, отримуючи цифрові моделі рельєфу та детальні карти

глибин [14].

На сьогодні дистанційне зондування та гідроакустичні методи батиметрії активно використовуються і розвиваються у світі для дослідження гірських озер, а також їх моніторингу на фоні природної еволюції й антропогенних змін [15, 16]. В Україні також відбувається активне впровадження цих засобів у дослідження озер різних регіонів та їх картографування у комплексі з використанням сучасних геоінформаційних технологій. На особливу увагу заслуговують результати ландшафтно-лімнологічних і геоекологічних досліджень озер Полісся та відповідні картографічні розробки вітчизняних науковців на основі батиметрії, дистанційного зондування, наземного картографування, натурного обстеження та інших методичних прийомів [15, 17]. Також реалізовані дослідження на прикладі озер Полісся підтверджують значимість картографування та актуальність створення кадастру водної болотних угідь на основі геоінформаційних систем для оптимізації їх геоекологічного стану та природоохоронних функцій національних парків [14, 18, 19].

Для якісної підготовки картографічного матеріалу та обґрунтування алгоритму застосування методів дистанційного зондування для цілей подальшого геоекологічного моніторингу озера Синевир важливе значення мають напрацювання групи дослідників під керівництвом В. Мартинюка та І. Зубковича [20, 21]. Їхній досвід картографування та організації батиметричного знімання озерного ложа, обґрунтовані теоретико-методичні основи геоекологічного моніторингу та оцінки сучасного геоекологічного стану озер у межах національних природних парків Полісся враховано у наших дослідженнях озера Синевир як найціннішого природного об'єкту Національного природного парку «Синевир» (рис. 1). Наші дослідження також враховують результати попереднього тематичного картографування улоговини озера Синевир, які були виконані в рамках геоморфологічного обстеження рельєфу дна та вивчення процесів нагромадження донних відкладів [22].

Матеріал і методи досліджень. Інструментальне дослідження та картографування озера Синевир в контексті розробки картографічного матеріалу для підготовки та впровадження довгострокового моніторингу ґрунтується на зніманні безпілотним літальним апаратом (БПЛА), оснащеним системою LiDAR, у комплексі з цифровим аерофотозніманням (із подальшою фотографічною обробкою зображень) та гідроакустичною батиметрією за допомогою ехолотного зондування днища озерного ложа. Реалізація комплексу таких знімальних робіт для водно-

болотних угідь в Українських Карпатах проводиться вперше, а тому важливим завданням на цьому етапі є загальне окреслення алгоритму виконання дослідження та технічних аспектів налаштування спеціалізованого обладнання.

Загалом, LIDAR як активний датчик, відбиває мільйони лазерних точок від поверхонь, які дають детальне уявлення про морфологію та структур земної поверхні, розподіл рослинності, інфраструктуру та топографію з абсолютною вертикальною точністю до кількох сантиметрів

[14]. Застосування сучасних методів дистанційного зондування забезпечило якісне знімання об'єкту нашого дослідження озера Синевир та прибережної території в оптичному діапазоні спектра цифровою аерофотокамерою із подальшою обробкою отримуваних зображень методами фотограметрії [14]. Їхньою перевагою є можливість швидкого отримання результатів з великою кількістю просторових даних, високою точністю та деталізацією.

Лідарне знімання озера Синевир та прибе-

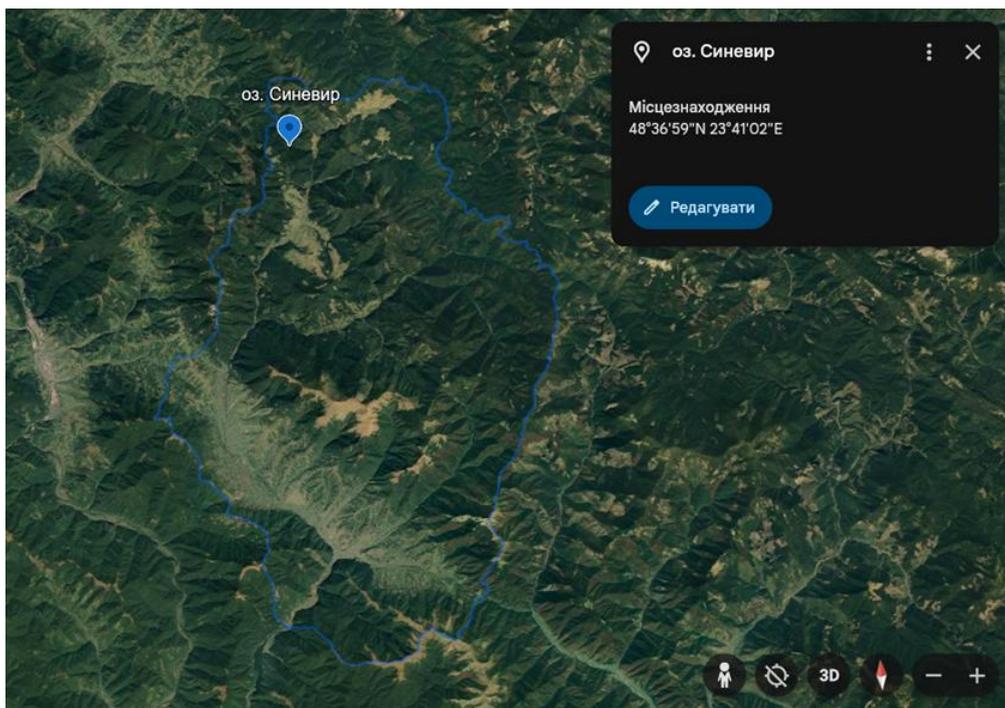


Рис. 1. Розташування озера Синевир на території Національного природного парку «Синевир» [23] / Fig. 1. Location of Lake Synevyr in the Synevyr National Nature Park [23]

режної території водно-болотного угіддя було виконано у вересні 2023 року із використанням мультикоптера DJI Matrice 300 RTK set, оснащеного лідаром DJI L1 (рис. 2). Лідар DJI L1 забезпечив ширину смуги сканування 100 м із перекриттям сканування 40 % та щільністю хмари точок близько 200 точок/м². Цифрове аерознімання виконано камерою RGB DJI L1 із роздільною здатністю 20 Мп, фокусною відстанню 8,8 мм та розміром кадру 5472×3078 пікселів (16:9). Перекриття аерознімання по маршруту становило 90 %, а міжмаршрутне – 50 %. Подальша обробка та опрацювання отриманих даних проводилося у програмному забезпеченні TerraSolid у версії UAV: TerraScan+TerraModeler+TerraMatch. На території досліджуваного об'єкта озера Синевир було запроєктовано та реалізовано лідарне знімання загальною площею 16 га на висоті 90 метрів при швидкості 3 м/с з перекриттям 60 %. БПЛА працював в режимі RTK з сантиметровою точністю. Дослідження проводилося в ясну ан-

тициклональну погоду та в умовах високої прозорості атмосфери.

Після безпосереднього проведення лідарного знімання озера Синевир та прибережної території наступним кроком був імпорт вихідних даних та їх опрацювання в програмному середовищі LiGeoreference та TERRASOLID. Було проведено налаштування характеристик проєкту (сканера, камери, системи координат тощо), POS опрацювання для отримання даних POS з високою точністю, а також виконано географічну прив'язку хмари точок, класифікацію хмар точок та їх колоризацію. При цьому середня квадратична помилка після обробки хмари точок склала менше 0,015 м. У результаті виконаних інструментальних досліджень було отримано хмару точок, які лягли в основу подальшої розробки цифрової моделі рельєфу та топографічного плану озера Синевир включно з прибережною територією (рис. 3). На основі зальотів БПЛА також проводилося цифрове аерознімання дослідної



Рис. 2. Підготовка до запуску та планування маршрутів зльотів БПЛА для лідарного знімання озера Синеvir / Fig. 2. Preparation for launch and planning of UAV flight routes for lidar scanning of Lake Synevyr

території, у результаті якого було одержано 378 знімків високої роздільної здатності.

Подальші дослідження озера Синеvir базувались на основі батиметричного знімання озера з використанням сучасних приладів та програмного забезпечення. Для батиметричних досліджень використовується сучасний гідроакустичний метод, який полягає в ехолотному зондуванні із синхронною GPS-прив'язкою ехолотних профілів. При проведенні батиметричного знімання на озері Синеvir використовувався надувний гумовий човен «BARK», що розрахований на чотири людини. На човні був встановлений ехолот/картплоттер виробництва фірми Lowrance HDS 12 Pro Active Imaging HD, модель якого оснащена навігаційним 12-канальним GPS-приймачем. Живлення ехолота здійснювалось компактними 12-вольтовими акумуляторними батареями. Робоча частота випромінювача звукових хвиль ехолота була встановлена 200 кГц і 800 кГц, а точність визначення глибини становила $\pm 0,5\%$. На борту над датчиком звуку ехолота/картплотера було встановлено GNSS приймач Trimble R8s для визначення точних координат вимірів глибини у режимі RTK від базової станції, розташованої на острові посеред озера (рис. 4).

Частота оновлення сигналу GPS-приймача

становила 5 Гц. Накопичення та суміщення даних з GNSS приймача та ехолота/картплотера виконувалось за допомогою програмного комплексу Trimble HYDROpro Navigation. Опрацювання батиметричних даних, представлених набором просторового положення ехолота (GNSS приймач) та промірів глибин (ехолот), виконано у програмному забезпеченні Trimble HYDROpro NavEdit, шляхом суміщення вимірів за позначкою часу. Редагування даних полягало у виявленні та виключенні помилкових вимірів ехолота та шумів по кожному галсу.

Батиметричне знімання озер є невід'ємним елементом картографування та дослідження озер, без якого неможливо якісно визначити й оцінити морфологічні та морфометричні параметри рельєфу озера, а також особливості геоecологічного стану та процесів функціонування аквального комплексу [20]. У процесі ехолотного батиметричного знімання озера Синеvir кожне одержане значення є інформацією про координати точки знімання, глибину, дату і час ехолотного проміру, температуру поверхні води, що зміщенні відносно попередньої точки проміру й іншу допоміжну інформацію. На рис. 5а показано галси промірів ехолотного зондування ложа озера Синеvir, рівновіддаленість яких вра-

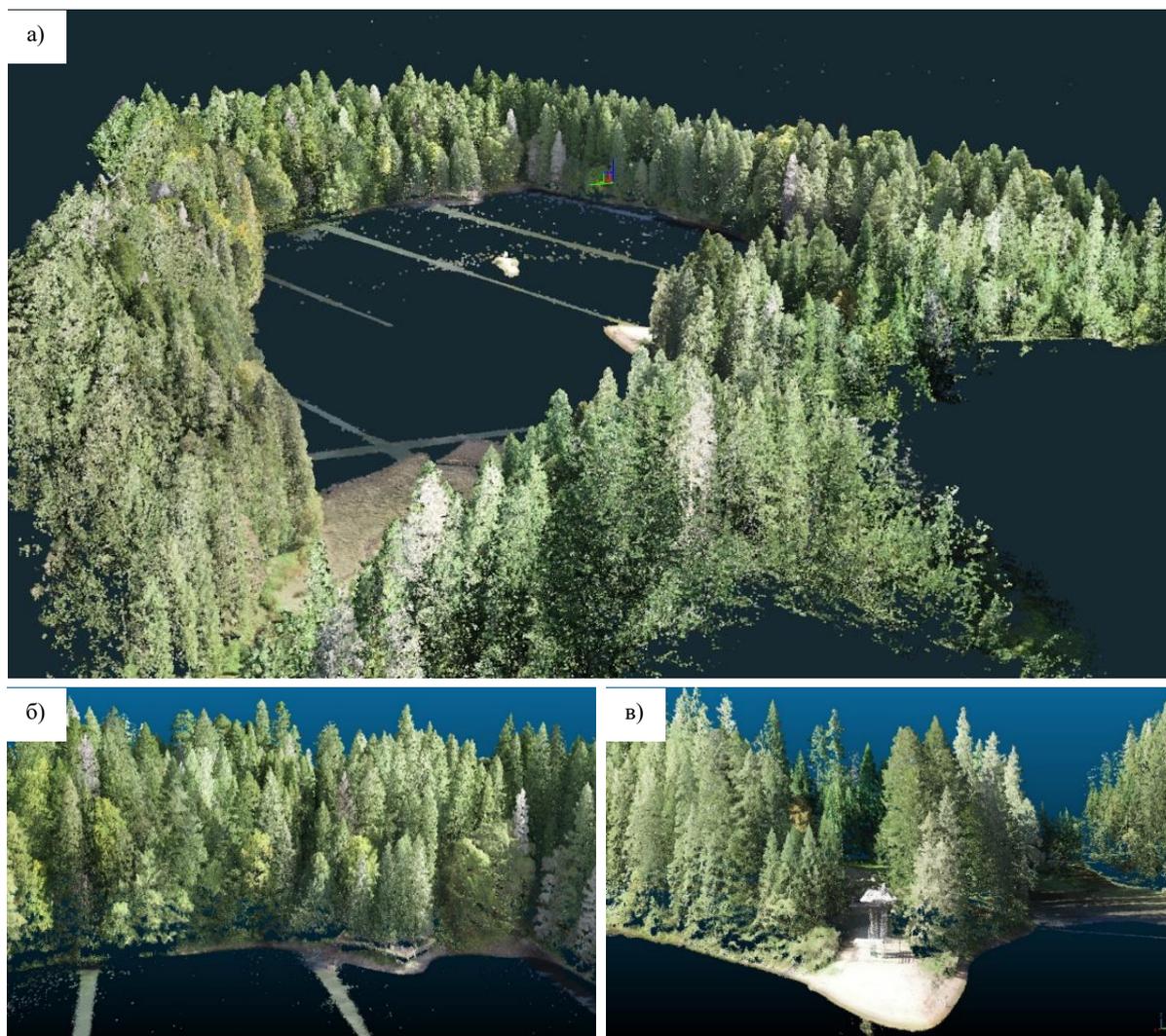


Рис. 3. Опрацювання хмари точок технології знімання LiDAR території озера Синевир: а) загальний план дослідної території; б) північна частина прибережної зони; в) західна частина прибережної зони / Fig. 3. Processing of the point cloud obtained using LiDAR technology for the territory of Lake Synevyr: a) general plan of the research territory; b) northern part of the coastal zone; c) western part of the coastal zone



Рис. 4. Базова GNSS станція для забезпечення батиметричного знімання ложа озера Синевир / Fig. 4. Basic GNSS station for bathymetric surveying of Lake Synevyr

ховувала розміщення в центральній частині озера ділянки суші (острова). Використання двох робочих частот ехолота/картплотера 200 кГц та 800 кГц дало змогу отримати комплексну інформацію про морфологію дна досліджуваного озера (рис. 5б, в). Високочастотні сигнали (800 кГц) забезпечили детальне картографування рельєфу

дна завдяки високій роздільній здатності, тоді як нижчочастотні сигнали частоти 200 кГц проникали глибше у придонні горизонти озernого ложа. Ця практика є виправданою через значні нагромадження акумулювативних донних відкладів та затоплених уламків дерев, наявність яких підтверджена нашими дослідженнями (рис. 5в).

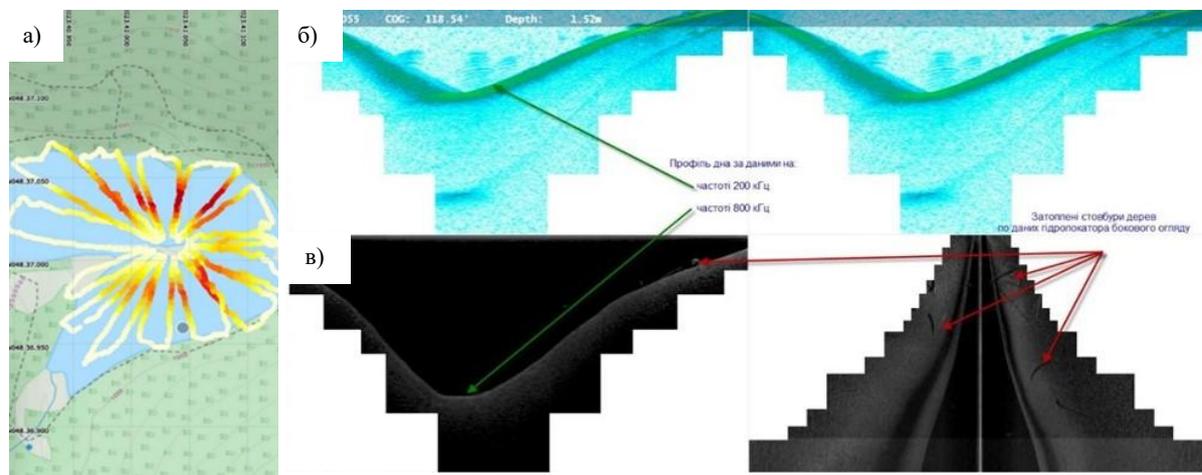


Рис. 5. Результати батиметричного знімання ложа озера Синеvir на основі ехолотного зондування: а) галси промірів; б) профілі дна на частоті 200 кГц; в) профілі дна на частоті 800 кГц /
Fig. 5. Results of bathymetric surveying of Lake Synevyr based on echo sounding: a) sounding lines; b) bottom profiles at a frequency of 200 kHz; c) bottom profiles at a frequency of 800 kHz

Виклад основного матеріалу досліджень.

Досліджуване нами озеро Синеvir та його прибережна територія загалом знаходиться у межах Негровець-Буштульського району Високогірно-полонинської фізико-географічної області [1]. Розчленований рельєф середньогірних ландшафтів та своєрідний механізм утворення озernого ложа в результаті давніх зсувних процесів зумо-

вили формування особливої морфологічної будови території, а картографування та батиметрія озера вимагають застосування сучасних технологій. У результаті опрацювання батиметричних даних отримано відмітки дна озера. А використавши берегову лінію та відмітки дна побудовано TIN модель дна озера Синеvir (рис. 6).

У результаті лідарного знімання озера Сине-

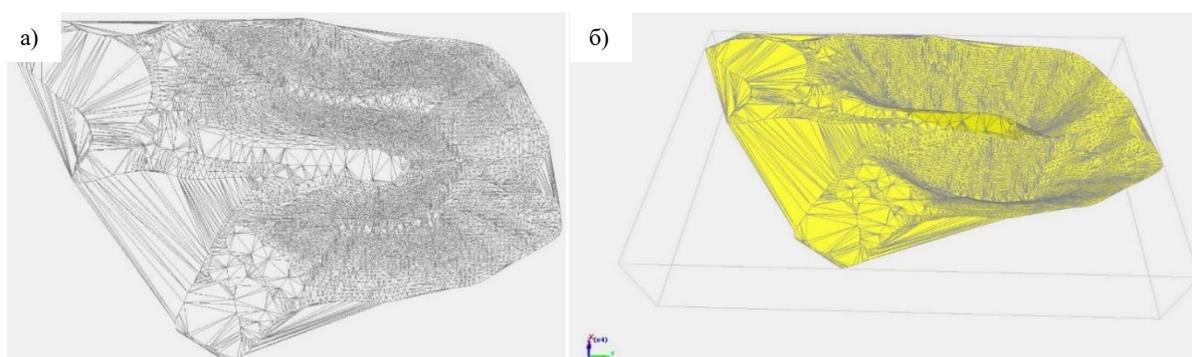


Рис. 6. Візуалізаційна модель ложа озера Синеvir, побудована за відмітками дна озера та структурними лініями: а) TIN-модель; б) TIN-модель у 3D /
Fig. 6. Visualization model of the bed of Lake Synevyr, constructed based on lake bottom elevations and structural lines: a) TIN model; b) TIN model in 3D

вир та прибережної території водно-болотного угіддя за допомогою БПЛА і подальшої обробки хмари точок нами побудовано цифрову модель місцевості (ЦММ) досліджуваної території (рис. 7), яка лягла в основу подальшого аналізу висот-

ної диференціації та картографування рельєфу прибережної до озера території. Вихідними даними для створення ЦММ були результати лідарного сканування Zenmuse L1 на платформі DJI Matrice 300. На першому етапі опрацювання у

програмному забезпеченні DJI Terra отримано хмару точок і траєкторії сканування. Другий етап опрацювання виконано у програмному забезпеченні Terra Scan: розділення траєкторії на лінії (Split trajectory), суміщення ліній сканування (Match passes), відокремлення накладань сканування (Cut overlap), згладжування та видалення шуму (Smoothen and remove noise), проріджування точок (Thin points to inactive), класифікування землі (Classify Ground), уточнення моделі за наземними контрольними точками, класифікування рослинності.

У процесі дистанційного зондування озера Синевир також реалізовано цифрове аерознімання у масштабі 1:1 000., в результаті якого отримано 378 знімків. Матеріали цифрового аерознімання Zenmuse L1 опрацьовано у програмному забезпеченні Agisoft Metashape. Процес опрацювання включав наступні кроки: обчислення центрів аерознімків (RtkLib), взаємне орієнтування знімків, зовнішнє орієнтування знімків (з визначенням параметрів камери), трансформування знімків з використанням ЦМР лідарного сканування, створення порізів та створення ортофотоплану з роздільною здатністю 5.9 см/пікс (рис. 8). Висока роздільна здатність необхідна для впровадження геоecологічного моніторингу та дослідження акваторії озера, прибережних ділянок та водозбору озера загалом. Розроблений ортофотоплан дозволяє ідентифікувати тип та структуру головної лісової, лучної й водноболотної рослинності, а також визначити фактичну межу та площу водного дзеркала на момент проведення знімання. Так, за цими даними визна-

чено загальну площу дослідження, що складає 15,4655 га та площу водного дзеркала – 5,9418 га.

Таким чином, поєднання методів дистанційного зондування поверхні за допомогою БПЛА та гідроакустичного батиметричного знімання у програмному середовищі DigitalS розроблено топографічний план озера Синевир та прибережної території у масштабі 1:1 000 (рис. 9). Його особливістю є якісне відображення орографічних та морфологічних особливостей озерного ложа та прибережної території озера, що є важливим з точки зору впровадження геоecологічного моніторингу та моделювання коливання рівня води в різних гідрологічних фазах. На топографічному плані горизонталі проведено через 0,5 м, що дозволяє детально проаналізувати морфометричні особливості території, морфологічного генезису утворення озерної улоговини та ін. У результаті батиметричного знімання та геоінформаційної обробки векторних даних при розробці топографічного плану визначено максимальну глибину озера Синевир станом на 29 вересня 2023 р., що становила 19,98 м. Також за даними локатора бокового огляду у процесі батиметрії озерного ложа виявлено затоплені стовбури дерев на дні водойми.

На основі топографічного плану нами розроблено два поперечні перерізи озера Синевир з метою відображення морфологічних рис днища та прибережної території (рис. 10). Вони також будуть використані для подальшого аналізу висотної диференціації морфологічних рис водноболотного угіддя озера Синевир та розробки ландшафтних профілів на різних експозиціях

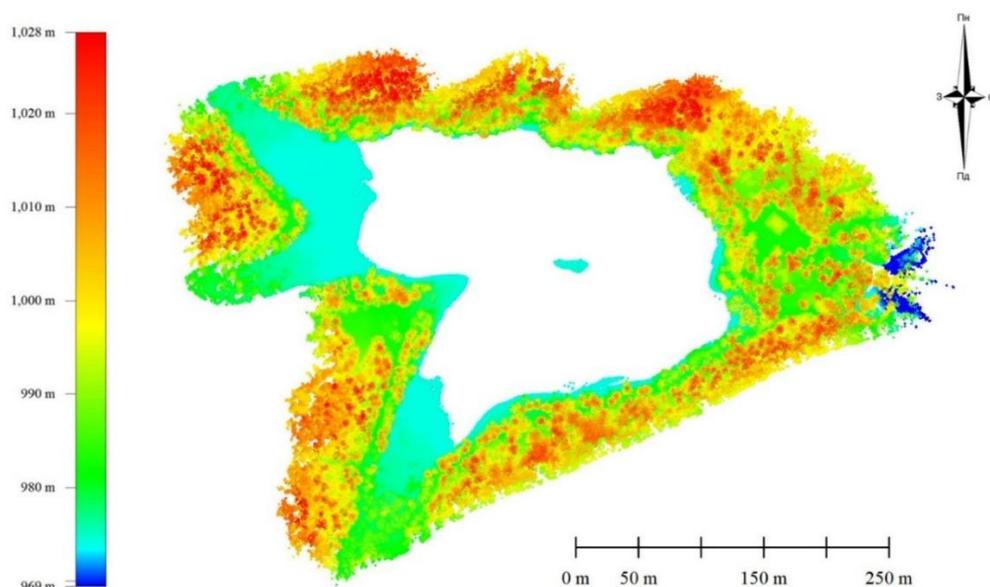


Рис. 7. Цифрова модель місцевості прибережної території озера Синевир (розроблено у програмі Terra Scan на основі опрацювання власних даних дистанційного зондування) / Fig. 7. Digital model of the coastal area of Lake Synevyr (developed in Terra Scan based on the processing of our own remote sensing data)

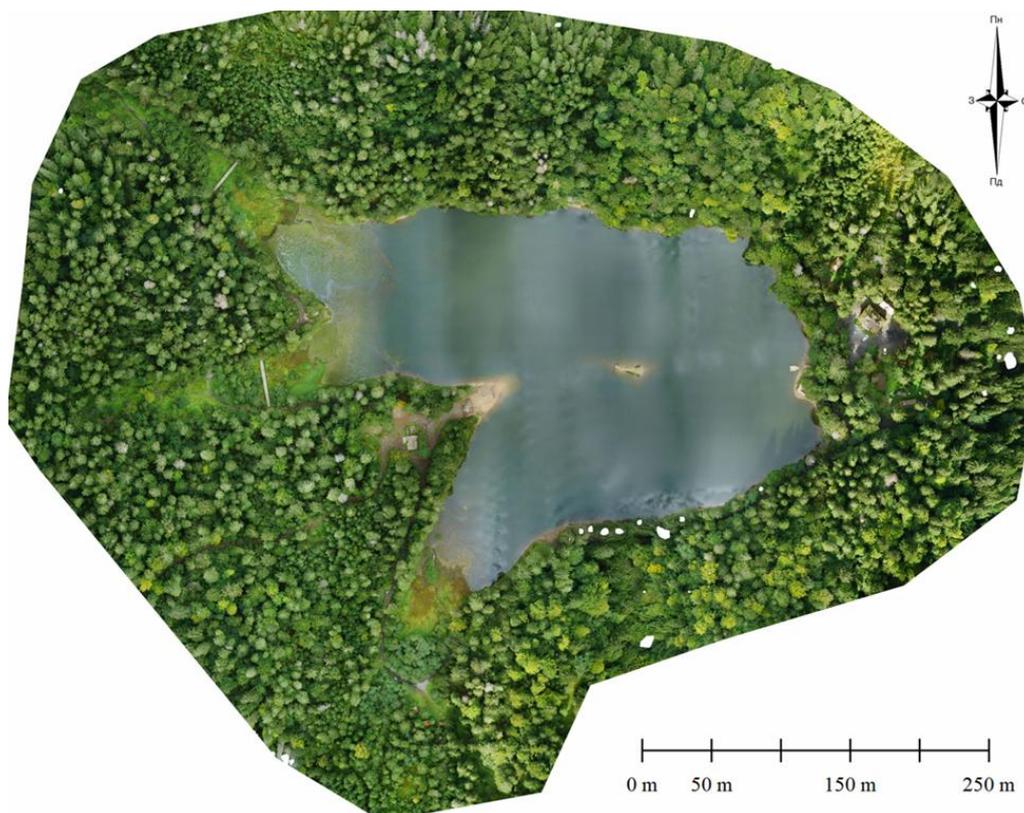


Рис. 8. Ортофотоплан озера Синеvir (розроблено на основі власних даних дистанційного зондування) / Fig. 8. Orthophoto map of Lake Synevyr (developed based on our own remote sensing data)

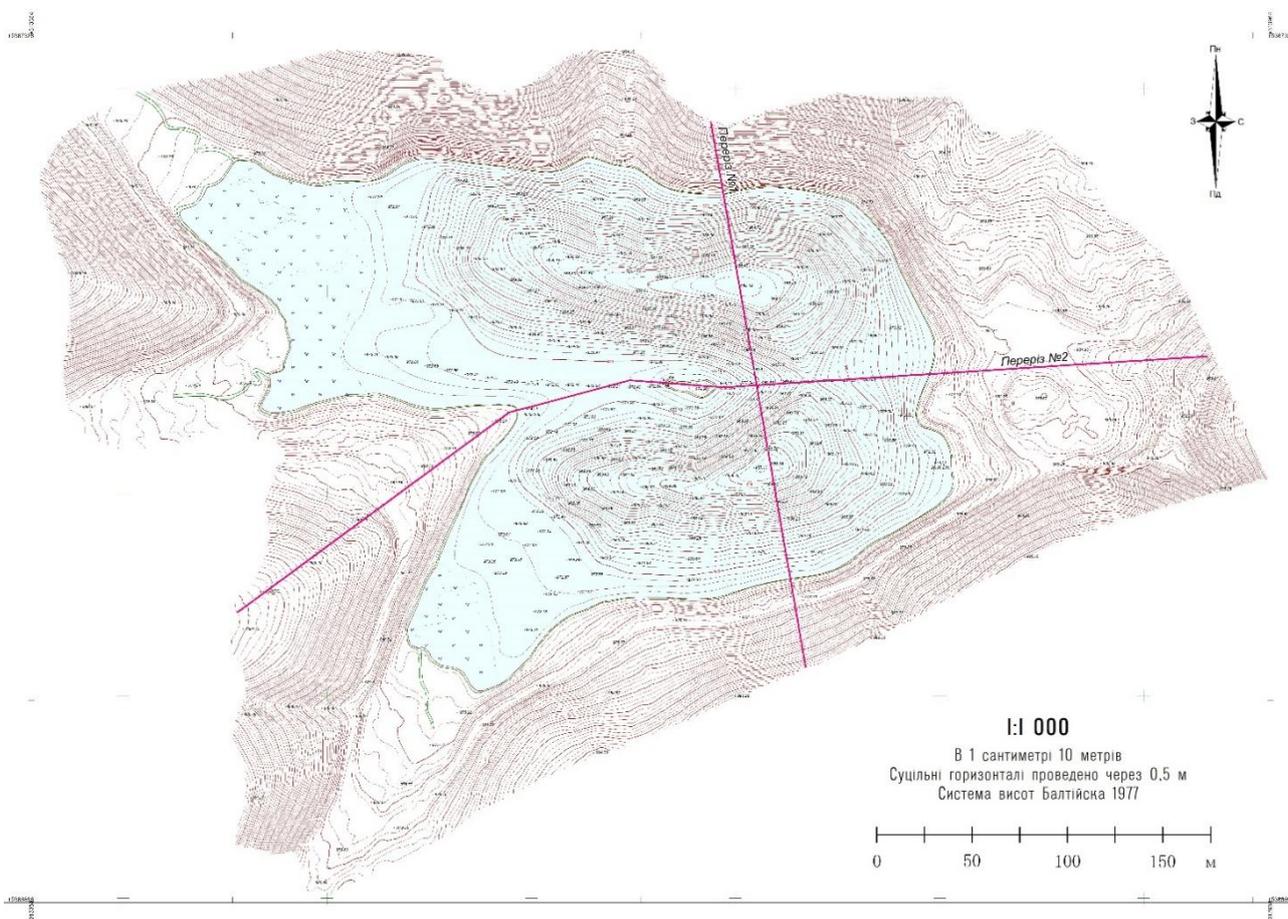


Рис. 9. Топографічний план озера Синеvir / Fig. 9. Topographic map of Lake Synevyr

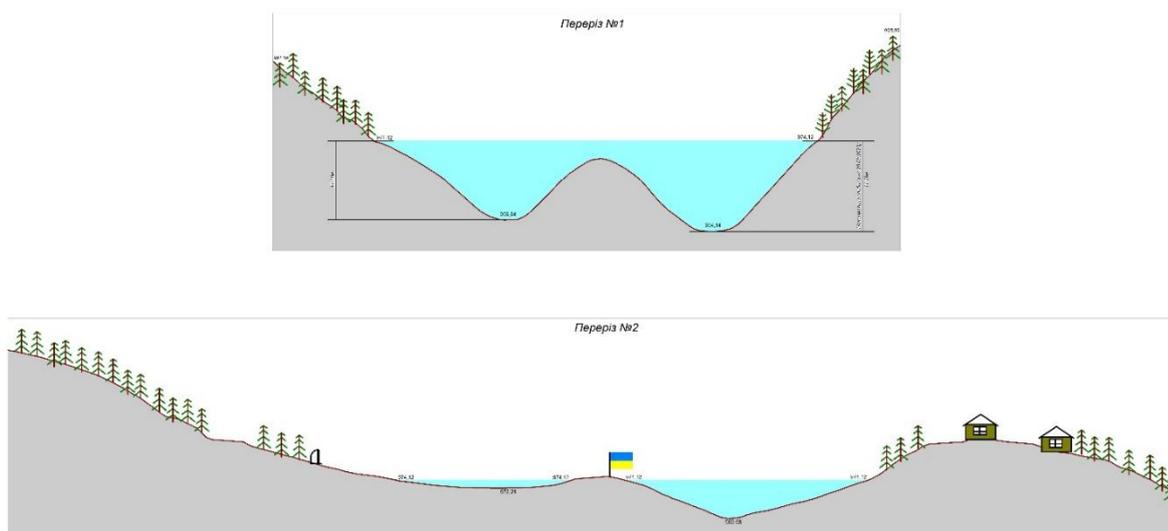


Рис. 10. Гіпсометричні профілі озера Синевир / Fig. 10. Hypsometric profiles of Lake Synevyr

схилів водозбору.

Висновки. У межах проведеного дослідження вперше реалізовано комплексне інструментальне картографування водно-болотного угіддя озера Синевир із застосуванням передових методів дистанційного зондування Землі, у тому числі аерофотознімання з безпілотного літального апарата, лідарного сканування та гідроакустичного батиметричного знімання. Поєднання цих високотехнологічних підходів дало змогу зафіксувати морфологічні особливості озерного ложа та прибережної території, а також розробити високоточні інтегровані картографічні матеріали. На основі даних лідарного знімання вперше для озера Синевир отримано високороздільні ортофотоплани (до 2 см/пікс), а також розроблено цифрову модель місцевості, що деталізує морфологічну будову берегової зони та прилягаючої водно-болотної місцевості. Також вперше серед гірських озер Українських Карпат було виконано гідроакустичне сканування ложа озера Синевир з використанням ехолота SideScan з геоприв'язкою, що забезпечило отримання батиметричних даних із високим рівнем точності (похибка $\pm 0,1$ м) та дозволило побудувати відповідну батиметричну модель. Отримані дані лягли в основу створення детального топографічного плану озера Синевир у масштабі 1:1 000 як ос-

новного результату нашого дослідження, що цілісно відображає рельєф приозерної території та ложа озера.

Запропонована та апробована на прикладі озера Синевир методика інструментального картографування водно-болотного угіддя, яка базується на поєднанні лідарного знімання, аерофотозйомки з БПЛА та гідроакустичного профілювання, засвідчила свою ефективність. Тому вона може бути успішно масштабованою для застосування на інших водно-болотних угіддях Карпатського регіону. Також завдяки застосуванню геоінформаційних технологій забезпечено інтеграцію багатопланових даних у єдине середовище, що створює підґрунтя для динамічного спостереження за змінами у стані водної екосистеми згідно цілей сталого розвитку ООН. Натомість, розроблені нами картографічні матеріали та отримані геопросторові дані будуть використані для подальших ландшафтно-екологічних та моніторингових досліджень у рамках міжнародного проекту «Впровадження моніторингу водно-болотних угідь міжнародного значення в Карпатському регіоні» (акронім – WeVaRe), що реалізується у рамках міжнародної програми трансграничного співробітництва Interreg VI-A NEXT Hungary-Slovakia-Romania-Ukraine.

Список використаних джерел

1. Мельник, А. В. (1999). Українські Карпати: еколого-ландшафтознавче дослідження: монографія. Львів: Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка.
2. Burianyk, O., Karabiniuk, M., Gostiuk, Z., & Terletska, Ya. (2021). Mapping of the forest pathological processes in landscape complexes (on the example of the Rybnyk Maidanskyi river basin in Skole Beskids). *International Conference of Young Professionals, GeoTerrace 2021*, 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215K3007>
3. Микитчак, Т. І. (2017). Трансформація екосистем льодовикових озер Українських Карпат. *Екологія та ноосферологія*, 28(3–4), 28–36. <https://doi.org/10.15421/031713>
4. Фельбаба-Клушина, Л. М. (2007). Фітоценотичні та флористичні особливості озера Синевир (Українські Карпати). *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Біологія*, 21, 179–181.

5. Dudynska, A. T., Romanko, V. O., Dudynsky, T. T., Karabiniuk, M. M., & Zhovnerchuk, O. V. (2023). Species diversity and distribution of synanthropic acarid mites (Acariformes, Acaridia) in Transcarpathia. *Zoodiversity*, 57(4), 283–292. <https://doi.org/10.15407/zoo2023.04.283>
6. Колесник, О. Б., & Радченко, О. Г. (Ред.). (2019). Національний природний парк «Синевир». Історія та сьогодення. Ужгород: ТДВ «Патент».
7. Міллер, Г. П. (1964). Льодовикові озера Чорногори. *Вісник Львівського ордену державного університету імені Івана Франка. Серія географічна*, 2, 44–52.
8. Демедюк, Ю., Колодій, В., & Демедюк, М. (1997). Сучасні донні відклади озер Українських Карпат. *Праці Наукового товариства ім. Шевченка*, 1, 77–90.
9. Микітчак, Т. І. (Ред.). (2014). Екосистеми лентичних водойм Чорногори (Українські Карпати). Львів: ЗУКЦ.
10. Гера, Й. Б., & Карпенко, Н. І. (2014). Геоморфологічний аналіз озерних улоговин Свидовецького масиву Українських Карпат. *Проблеми геоморфології і палеогеографії Українських Карпат і прилеглих територій*, 5, 46–53.
11. Антошик, О. (2014). Збереження озер та приозерних територій високогір'я Свидовецького масиву Українських Карпат. *Вісник Львівського університету. Серія географічна*, (45), 267–275.
12. Karabiniuk, M., Saliuk, M., Burianyk, O., Hostiuk, Z., & Lutso, V. (2025). Mapping degradation hotspots of highlands geocomplexes in Chornohora under recreational pressure around Nesamovyte Lake (Ukrainian Carpathians). *18th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, Monitoring 2025*, 1–5.
13. Dong, P., & Chen, Q. (Eds.). (2017). *LiDAR Remote Sensing and Applications*. CRC Press. <https://doi.org/10.4324/9781351233354>
14. Abdullah, Q. A. (2016). A star is born: The state of new lidar technologies. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 82(5), 307–312.
15. Necsoiu, M., Mindrescu, M., Onaca, A., & Wigginton, S. (2016). Recent morphodynamics of alpine lakes in Southern Carpathian Mountains using high-resolution optical imagery. *Quaternary International*, 415, 164–174. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.12.032>
16. Hamilton, S. E., McGehee, D. D., Nyamweya, C., et al. (2022). High-resolution bathymetries and shorelines for the Great Lakes of the White Nile basin. *Scientific Data*, 9, 642. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01742-3>
17. Martyniuk, V., Korbutiak, V., Hopchak, I., Pryshchepa, A., Zubkovych, I., & Shuliakovska, A. (2022). Landscape and limnology monitoring of reservoirs in Cheremskiy Nature Reserve. *16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, Monitoring 2022*, 2022, 1–6. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580031>
18. Kirvel, I., Martyniuk, V., Kovalchuk, I., Andronache, I., Korbutiak, V., & Zubkovych, I. A. (2014). Cartographic Landscape Analysis of the Geo-Ecological Condition of the Natural Reserve Object – Lake Doshne (Volyn Polissya, Ukraine). *Limnological Review*, 24, 385–405. <https://doi.org/10.3390/limnolrev24030023>
19. Kovalchuk, I. P., Martyniuk, V. O., & Šeirienė, V. (2020). The basin-landscape approach to the protection and condition optimization of the lakes of the national parks. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series: Geography. Ecology*, 53, 239–254. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2020-53-18>
20. Мартинюк, В. О., Андрійчук, С. В., & Зубкович, І. В. (2020). Досвід батиметричного моделювання та ландшафтного картографування озер польського регіону України. *У У. Керпінська та ін. (Ред.), Scientific developments of Ukraine and EU in the area of natural sciences: Collective monograph (Ч. 2: 495–522)*. Riga: Izdevnieciba «Baltija Publishing».
21. Zubkovych, I., Kovalchuk, I., Martyniuk, V., Korbutiak, V., & Andriychuk, S. (2021). Echo-sounding of lakes of the Nobel national nature park for the purposes of landscape mapping and geoecological monitoring. *International Conference of Young Professionals, GeoTerrace 2021*, 2021, 1–6. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215K3029>
22. Демедюк, М. С., Колодій, В. В., & Зденюк, М. В. (1985). Умови утворення та вік Синевирського озера. *Доповіді АН УРСР. Серія Б: Геологічні, хімічні та біологічні науки*, 11, 8–11.
23. Google LLC. (2025). *Google Earth [Computer software]*. Google. <https://earth.google.com>

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Конфлікт інтересів: автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів

Instrumental Study and Mapping of Lake Synevyr: Remote Sensing Integration for Wetland Geocological Monitoring

*Ivan Kalynych*¹

PhD (Engineering), Associate Professor, Dean of the Faculty of Geography,
¹ Uzhhorod National University, Uzhhorod, Ukraine;

*Mykola Karabiniuk*¹

PhD (Geography), Associate Professor,
Department of Physical Geography and Efficient Environmental Management;

*Mariia Nychvyd*¹

Associate Professor of the Department of Geodesy, Land Management and Geoinformatics;

*Ivan Prodanets*²

Director

² Zakarpattia Regional Branch of the State Enterprise
“Ukrainian State Aerial Geodetic Enterprise”;

*Oleksii Prymak*³

Director, ³ Private Enterprise “Geodetic Engineering Agency”;

*Vasyl Plyska*⁴

Head of the GNSS Observation Processing Laboratory,

⁴ Control Center of the Ukrainian Permanent GNSS Network

ABSTRACT

Problem Statement and Objective. The study aims to create a high-precision topographic framework for Lake Synevyr, one of the key internationally significant wetlands in the Carpathian region, by integrating remote sensing techniques and hydroacoustic bathymetric surveying. This approach has facilitated the development of a cartographic foundation for the implementation of long-term geocological monitoring and the assessment of spatiotemporal changes in the lake system under increasing anthropogenic pressure and climate change.

Methodology. The instrumental survey was conducted through a comprehensive mapping campaign using an unmanned aerial vehicle (UAV) equipped with a LiDAR system, photogrammetric processing of high-resolution digital imagery, and echosounding of the lakebed with GNSS referencing. The collected data were processed in specialized software environments (Terrasolid, Agisoft Metashape, Trimble HYDROpro, Digitals), enabling the generation of a digital terrain model, orthophotomap, TIN bathymetric model, and topographic plan.

Study results. For the first time, a comprehensive high-accuracy instrumental mapping of Lake Synevyr has been carried out, including several key components: construction of a digital terrain model of the coastal area, creation of an orthophotomap with a ground sampling distance of 5.9 cm/pixel, and execution of bathymetric profiling with depth data obtained at an accuracy of $\pm 0,1$ m. As a result, the maximum lake depth of 19.98 m was recorded, a 3D model of the lakebed was constructed, and hypsometric profiles were developed. The acquired remote sensing and field survey data formed the basis of a high-quality 1:1 000 scale topographic map, which constitutes the core outcome of the study.

Scientific novelty and practical significance. For the first time, a complex instrumental mapping of the mountainous Lake Synevyr has been implemented using an integrated approach combining LiDAR scanning, UAV-based aerial photography, and hydroacoustic bathymetric surveying with high-precision georeferencing. This enabled the acquisition of fundamentally new spatial information on the morphology of the lakebed and the creation of a multi-component geospatial data system and high-quality cartographic materials. The developed topographic plan and digital datasets provide a robust basis for further spatial analysis of natural changes and serve as a cartographic foundation for implementing long-term geocological monitoring of Lake Synevyr. The data and cartographic products obtained enable highly accurate hydromorphological, landscape-ecological, and other scientific investigations, as well as the identification and monitoring of the dynamics of natural and anthropogenic processes. The proposed instrumental mapping methodology can be adapted for other sites in the Carpathian region, including within the framework of cross-border conservation initiatives and the systematic management of territories with special ecological status.

Keywords: Lake Synevyr, Ukrainian Carpathians, wetland, bathymetry, remote sensing, topographic survey, geocological monitoring.

References

1. Melnyk, A. V. (1999). *Ukrainian Carpathians: ecological and landscape research: monograph*. Lviv: Publishing Center of Ivan Franko National University of Lviv [in Ukrainian].
2. Burianyk, O., Karabiniuk, M., Gostiuk, Z., & Terletska, Ya. (2021). Mapping of the forest pathological processes in landscape complexes (on the example of the Rybnyk Maidanskyi river basin in Skole Beskids). *International Conference of Young Professionals, GeoTerrace 2021*, 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215K3007>
3. Mykitchak, T. I. (2017). Transformation of the ecosystems of glacial lakes in the Ukrainian Carpathians. *Ecology and Noospherology*, 28(3–4), 28–36. <https://doi.org/10.15421/031713> [in Ukrainian].
4. Felbaba-Klushyna, L. M. (2007). Phytocoenotic and floristic features of Lake Synevyr (Ukrainian Carpathians). *Scientific Bulletin of Uzhhorod University. Series Biology*, 21, 179–181 [in Ukrainian].

5. Dudynska, A. T., Romanko, V. O., Dudynsky, T. T., Karabiniuk, M. M., & Zhovnerchuk, O. V. (2023). Species diversity and distribution of synanthropic acarid mites (Acariformes, Acaridia) in Transcarpathia. *Zoodiversity*, 57(4), 283–292. <https://doi.org/10.15407/zoo2023.04.283>
6. Kolesnyk, O. B., & Radchenko, O. H. (Eds.). (2019). *Synevyr National Nature Park: History and present*. Uzhhorod: Patent [in Ukrainian].
7. Miller, H. P. (1964). *Glacial lakes of Chornohora*. *Visnyk of the Lviv Ivan Franko State University. Geographical Series*, 2, 44–52 [in Ukrainian].
8. Demediuk, Yu., Kolodii, V., & Demediuk, M. (1997). Modern bottom sediments of the lakes of the Ukrainian Carpathians. *Proceedings of the Shevchenko Scientific Society*, 1, 77–90 [in Ukrainian].
9. Mykitchak, T. I. (Ed.). (2014). *Ecosystems of lentic water bodies of Chornohora (Ukrainian Carpathians)*. Lviv: ZUKTS [in Ukrainian].
10. Hera, Y. B., & Karpenko, N. I. (2014). Geomorphological analysis of the lake basins of the Sydivets massif of the Ukrainian Carpathians. *Problems of Geomorphology and Paleogeography of the Ukrainian Carpathians and Adjacent Territories*, 5, 46–53 [in Ukrainian].
11. Antoshyk, O. (2014). Preservation of lakes and lake-adjacent areas in the highlands of the Sydivets massif of the Ukrainian Carpathians. *Visnyk of the Lviv University. Geographical Series*, (45), 267–275 [in Ukrainian].
12. Karabiniuk, M., Saliuk, M., Burianyk, O., Hostiuk, Z., & Lutso, V. (2025). Mapping degradation hotspots of highlands geocomplexes in Chornohora under recreational pressure around Nesamovyte Lake (Ukrainian Carpathians). *18th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, Monitoring 2025*, 1–5.
13. Dong, P., & Chen, Q. (Eds.). (2017). *LiDAR Remote Sensing and Applications*. CRC Press. <https://doi.org/10.4324/9781351233354>
14. Abdullah, Q. A. (2016). A star is born: The state of new lidar technologies. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 82(5), 307–312.
15. Necsoiu, M., Mindrescu, M., Onaca, A., & Wigginton, S. (2016). Recent morphodynamics of alpine lakes in Southern Carpathian Mountains using high-resolution optical imagery. *Quaternary International*, 415, 164–174. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.12.032>
16. Hamilton, S. E., McGehee, D. D., Nyamweya, C., et al. (2022). High-resolution bathymetries and shorelines for the Great Lakes of the White Nile basin. *Scientific Data*, 9, 642. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01742-3>
17. Martyniuk, V., Korbutiak, V., Hopchak, I., Pryshchepa, A., Zubkovych, I., & Shuliakovska, A. (2022). Landscape and limnology monitoring of reservoirs in Cheremskiy Nature Reserve. *16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, Monitoring 2022*, 2022, 1–6. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580031>
18. Kirvel, I., Martyniuk, V., Kovalchuk, I., Andronache, I., Korbutiak, V., & Zubkovych, I. A. (2014). Cartographic Landscape Analysis of the Geo-Ecological Condition of the Natural Reserve Object – Lake Doshne (Volyn Polissya, Ukraine). *Limnological Review*, 24, 385–405. <https://doi.org/10.3390/limnolrev24030023>
19. Kovalchuk, I. P., Martyniuk, V. O., & Šeirienė, V. (2020). The basin-landscape approach to the protection and condition optimization of the lakes of the national parks. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series: Geography. Ecology*, 53, 239–254. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2020-53-18>
20. Martyniuk, V. O., Andriychuk, S. V., & Zubkovych, I. V. (2020). Experience of bathymetric modeling and landscape mapping of lakes in the Polissia region of Ukraine. In U. Kempinska et al. (Eds.), *Scientific developments of Ukraine and EU in the area of natural sciences: Collective monograph (Part 2: 495–522)*. Riga: Baltija Publishing [in Ukrainian].
21. Zubkovych, I., Kovalchuk, I., Martyniuk, V., Korbutiak, V., & Andriychuk, S. (2021). Echo-sounding of lakes of the Nobel national nature park for the purposes of landscape mapping and geoecological monitoring. *International Conference of Young Professionals, GeoTerrace 2021*, 2021, 1–6. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215K3029>
22. Demediuk, M. S., Kolodii, V. V., & Zdeniuk, M. V. (1985). Formation conditions and age of Lake Synevyr. *Reports of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR. Series B: Geological, Chemical and Biological Sciences*, 11, 8–11 [in Ukrainian].
23. Google LLC. (2025). *Google Earth [Computer software]*. Google. <https://earth.google.com>

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest

Received 9 August 2025

Accepted 5 October 2025