

УДК 004.925.84

**БЛАК О.О.**, заст. ген. директора, технічний директор ПАТ "Закарпаттяобленерго",  
**ТРЕТЯК К.Р.**, докт. техн. наук, проф., директор Інституту геодезії  
Національного університету "Львівська політехніка",  
**МАЛИЦЬКИЙ А.Ю.**, зав. лаб. "Геодезії, геоінформатики та 3D сканування",  
**ШИЛО Є.О.**, аспірант Національного університету "Львівська політехніка"

## СТВОРЕННЯ КОМПЛЕКСНОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ 3D МОДЕЛІ ОНОКІВСЬКОЇ ГЕС

*Розглянуто автоматизоване проектування нових малих ГЕС та реконструкція існуючих з використанням 3D моделі та безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та наземних лазерних сканерів.*

*Ключові слова: 3D моделі, малі ГЕС, безпілотні літальні апарати, лазерне сканування.*

Основними завданнями стратегії розвитку малої гідроенергетики України є реконструкція та відновлення діючих та законсервованих малих ГЕС, будівництво нових малих ГЕС на існуючих водосховищах та річках з метою комплексного вирішення проблем енергозабезпечення області та керованого захисту території від повеней.

У більшості розвинених країн досягнутий високий рівень освоєння ресурсів малої гідроенергетики. Світовим лідером у використанні малої гідроенергетики є Китай, де потужність малих ГЕС складає близько 35 млн. кВт. В Україні загальна потужність малих ГЕС, які експлуатуються, складає більше 100 МВт. З них більше 100 малих і міні-ГЕС вимагають відновлення та реконструкцію [3]. Загальний економічно ефективний потенціал малих ГЕС України оцінюється в більш ніж 3,0 млрд. кВт-год. Згідно стратегії розвитку малої гідроенергетики України, планується довести потужність малих ГЕС у 2020 р. до 700 МВт, а в 2030 р. – до 1040 МВт. Більша частина неосвоєного потенціалу знаходиться у Карпатському регіоні, де передбачається будівництво малих ГЕС та реконструкція існуючих. Особливо актуальним для розвитку малої гідроенергетики є Закарпаття.

З метою раціонального використання водних ресурсів річок Закарпаття 25 лютого 2011 р. Закарпатська обласна рада затвердила Програму комплексного використання водних ресурсів Закарпатської області [1, 2]. Метою Програми є практичне використання гідроенергетичного потенціалу річок області, що дозволить збільшити власне виробництво електроенергії шляхом будівництва на території області об'єктів гідроенергетики та забезпечення комплексного використання водних ресурсів шляхом розміщення інших об'єктів водокористування.

До переваг малої гідроенергетики відноситься низька собівартість електроенергії, високий

коефіцієнт корисної дії обладнання, мінімізація екологічного впливу на довкілля, низькі технологічні втрати. Однак до негативних чинників відносяться затоплення водосховищем земель, небезпека аварій під дією геодинамічних факторів. Відповідно важливе значення для ефективного використання безаварійної роботи малих ГЕС є автоматизоване багатофакторне проектування нових гідротехнічних об'єктів та реконструкція існуючих з використанням сучасних технологій, а також безперервний процес технічного нагляду за їх експлуатацією відповідними службами та спеціалізованими організаціями.

Система автоматизації проектних робіт (САПР) призначена для створення креслень, конструкторської та технологічної документації та 3D моделей об'єкта. Основою для проведення проектування чи реконструкції малих ГЕС є 3D модель місцевості та проектного або існуючого об'єкта. Для автоматизованого створення 3D моделей використовуються сучасні безпілотні літальні апарати (БПЛА) та наземні лазерні сканери. Ці новітні технології були застосовані при створенні 3D моделі прилеглої території Оноківської ГЕС та її інженерних споруд.

Оноківська ГЕС входить у структуру ПАТ "Закарпаттяобленерго" та розташована на дериваційному каналі, яким здійснюється відведення води з річки Уж для господарсько-питного водозабезпечення м. Ужгород. ГЕС працює з початку 40-х років ХХ ст. Відповідно її обладнання є зношеним і застарілим. Реконструкція та оновлення обладнання може суттєво збільшити кількість виробленої енергії.

Для створення 3D моделі території ГЕС було використано БПЛА. В сучасній геодезичній практиці безпілотні літальні апарати дуже швидко витісняють класичні наземні методи знімання. БПЛА дозволяють набагато швидше отримувати якісну інформацію геодезичного знімання [7].



Рис. 1. БПЛА Trimble UX5 встановлений на катапульти



Рис. 2. Схема розміщення поодиноких знімків та контрольних точок

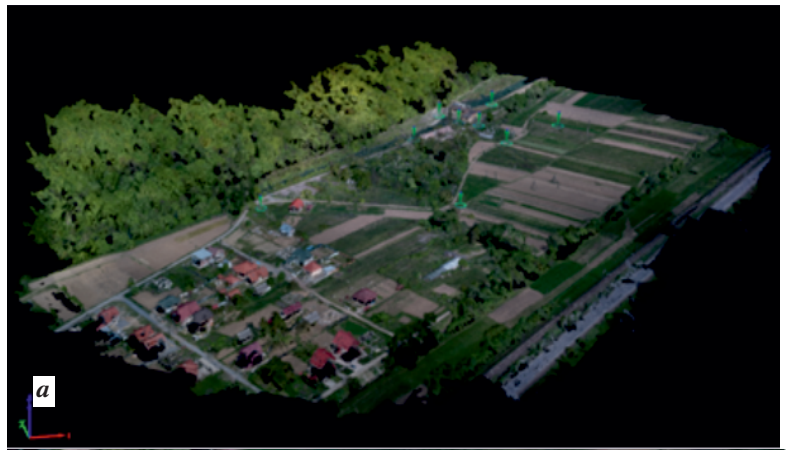


Рис. 3. Фрагмент хмари точок об'єкта знімання, а – сукупність точок, яка відображає територію Оноківської ГЕС та прилеглу територію, б – фрагмент сукупності точок що відображає інженерні споруди ГЕС.

Одержані дані обробляються в спеціалізованому програмному забезпеченні і є основою в

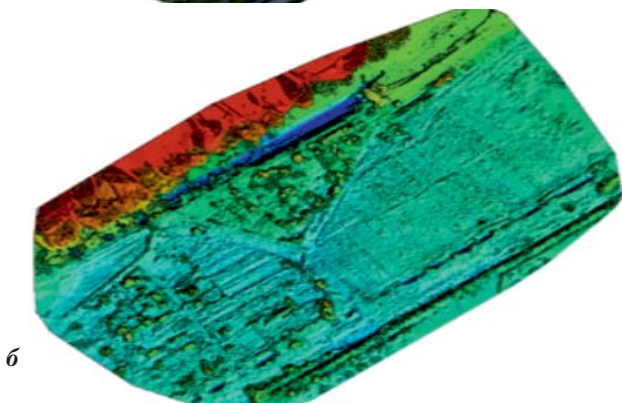
проекуванні будівництва, створення цифрових карт, складанні топографічних планів місцевості.

Використання БПЛА передбачає два етапи роботи: польовий та камеральний. При польових роботах виконується власне аерознімання: отримання знімків території об'єкта, координат центрів та кутів нахилу цих знімків (так званих елементів зовнішнього орієнтування), а також закладання і визначення координат опорних точок (опознаків). Камеральні роботи полягають у побудові цифрової моделі рельєфу та створенні ортофотоплану та 3 D моделі.

Аерознімання виконувалось БПЛА Trimble UX5 (Рис. 1), оснащеного цифровою камерою з ПЗЗ матрицею на 16 МП, а також одночастотним GPS приймачем. Керування БПЛА виконується за допомогою програмного забезпечення Trimble Agial Image, що встановлене на польовий контролер, який комунікує з БПЛА за допомогою радіозв'язку. Політ даного літака повністю автоматизований, але передбачене також керування в ручному режимі (цей режим потрібен при виникненні не штатних ситуацій). Автопілот керує БПЛА на основі заданих параметрів, а саме: межі об'єкта знімання, висоти польоту, поздовжнього і поперечного перекриття між знімками. Для виз-



а



б

Рис. 4. Ортофотоплан та растрова ЦМР Оноківської ГЕС а – Ортофотоплан; б – Растрова ЦМР



Рис. 5. Наземний лазерний сканер Faro Focus 3D 120

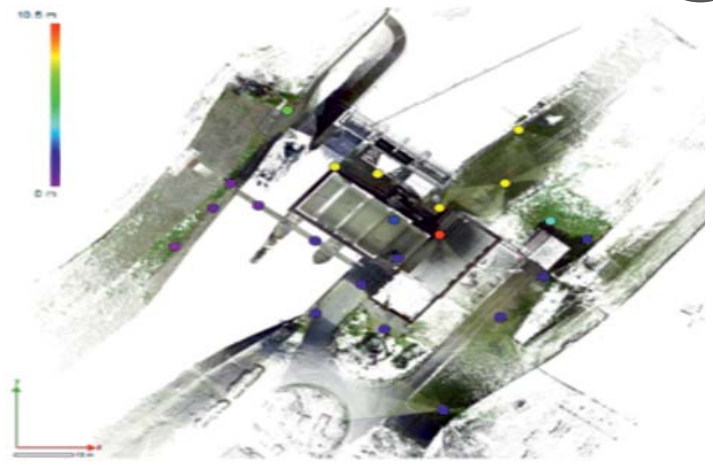


Рис. 6. Схема розташування станцій сканування на території Оноківської ГЕС

начення координат опорних точок застосовувався двочастотний GNSS приймач Trimble R7, який у режимі реального часу забезпечував 3 см. точність визначення просторових координат.

Аерознімання проводилося на Оноківській ГЕС та прилеглий до неї території загальною площею знімання 0,31 км<sup>2</sup>. Політ виконувався з висоти 150 м, дотримуючись поздовжнього і поперечного перекриття між знімками – 70% × 70%. В результаті польових робіт отримано 154 знімки, з роздільною здатністю 4,8 см. Для камерального опрацювання результатів знімання та перевірки моделі рельєфу і ортофотоплану використано 9



Рис. 7. Точкова модель Оноківської ГЕС, одержана за результатами наземного лазерного сканування

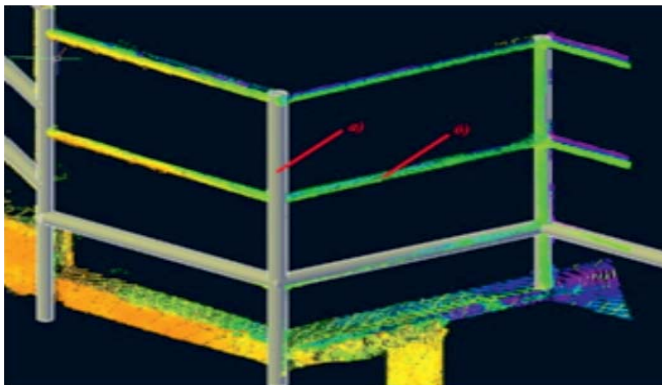


Рис. 8. Вписування CAD моделі в сукупність точок.  
а) CAD модель циліндра; б) сукупність точок труби

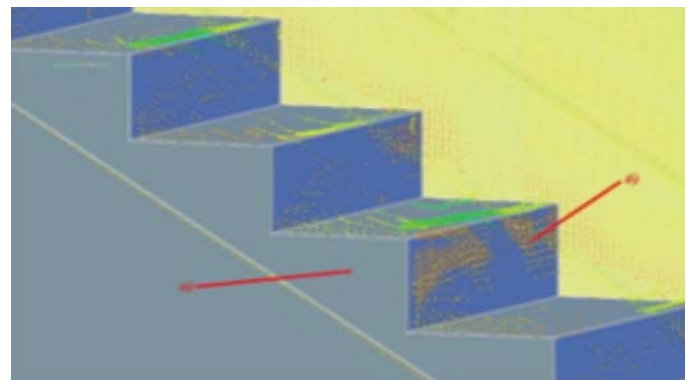


Рис. 9. Побудова моделі сходів  
а) CAD модель циліндру; б) сукупність точок труби

контрольних точок на території ГЕС, координати яких визначені ГНСС методом з точністю 1 см. (Рис. 2).

На Рис. 2 зображена схема маршрутів польоту (зелені лінії), подинки знімки (червоні точки), контрольні точки (сині хрести).

Процес камерального опрацювання розділено на три етапи:

- ініціалізація камери і знімків та пошук на знімках спільних точок;

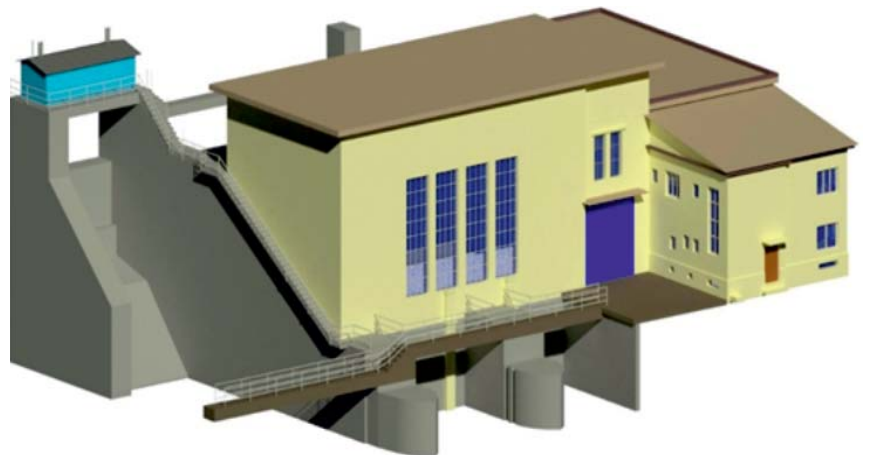


Рис. 10. 3D модель Оноківської ГЕС



- побудова цифрової моделі поверхні (хмари точок) (Рис. 3);

- побудова ортофотоплану (Рис. 4, а) та растрової моделі висот поверхні місцевості (Рис. 4, б).

Опрацювання результатів знімання виконувалось за допомогою програмного забезпечення *Ріх4dmapper*. Похибка визначення планового положення об'єктів на ортофотоплані – 5 см, а визначення висоти за 3D моделлю не перевищує 15 см. При необхідності ці характеристики можна покращити шляхом зменшення висоти знімання, або зміною фотокамери.

Для детального та точного знімання будівель та споруд Оноківської ГЕС використано технологію наземного лазерного сканування. Наземне лазерне сканування дозволяє з високою швидкістю (сотні тисяч точок в секунду) визначити координати значної кількості точок на поверхні об'єктів, які характеризують його форму, розміри та розташування в просторі. Ця технологія реалізується з допомогою спеціальних приладів – наземних лазерних сканерів, які вимірюють горизонтальні та вертикальні напрямки розповсюдження лазерного випромінювання і похилі відстані.

Швидкість сканування регулюється оператором в залежності від необхідної детальності та точності вимірів. Тотальне знімання об'єкта дозволяє звести польові роботи лише до автоматичного знімання об'єкта або території без виділення контурних точок. Дані одержані в результаті лазерного сканування дозволяють повністю відтворити будь-який об'єкт у цифровому форматі у вигляді 3D моделі. Побудова моделі споруди відбувається шляхом логічного визначення приналежності кожної точки чи групи точок до певної поверхні та утворення з них точок відповідного елемента. Завдяки одночасній роботі цифрової фотокамери та лазерного сканера, визначена хмара точок суміщається з цифровим знімком, що дозволяє кожній точці присвоїти відповідний колір.

Точкова 3D модель відсканованого об'єкта може складатися з мільярдів точок, що дозволяє отримати об'єктивну інформацію, яка характеризується високою точністю та детальністю, нівелює вплив помилок виконавця, але вимагає для опрацювання високих технічних параметрів комп'ютера. Крім того, результат сканування у великій мірі залежить від програмного забезпечення, у якому опрацьовуватимуться хмари точок. Незважаючи на наведені недоліки роботи з даними сканування, досвід підтвердив, що всі описані особливості технології дозволяють лазерне сканування ефективно використовувати на різних етапах будівництва та експлуатації гідро-

технічних споруд, а саме:

- топографічна зйомка території проєктованого об'єкта;

- визначення відхилень від конструкторської документації в процесі будівництва;

- уточнення конструкторської документації;

- розрахунок потрібних обсягів будівельних матеріалів та фіксація виконаних обсягів робіт;

- створення та оновлення виконавчої документації за підсумками будівництва;

- побудова обмірних креслень і планів під монтаж устаткування;

- 3D моделювання об'єкта в цілому для створення системи управління об'єктом або групою об'єктів;

- моніторинг стану геометричних параметрів несучих конструкцій об'єкта з метою визначення допустимих термінів експлуатації;

- обміри геометрії силових механізмів (ворота шлюзів, приводні механізми воріт) на предмет їх відповідності вимогам експлуатації та з метою розробки найбільш оптимальної схеми їх монтажу і визначення можливостей монтажу нового обладнання в рамках наявної споруди.

- детальні обміри конструкцій об'єктів після аварій з метою визначення ступеня руйнувань і необхідних обсягів ремонтних робіт.

3D сканування проводиться у два етапи: польові виміри та камеральне опрацювання результатів вимірів. Завдання польового етапу – одержати необхідну кількість даних з заданою точністю. Цей етап дуже відповідальний, адже редагування даних лазерного сканування є досить обмеженим. При неякісному проведенні польового етапу, камеральні роботи можуть бути ускладненими, або значно обмеженими. Сам польовий етап зводиться до створення відповідних станцій сканування, з яких проводять знімання та встановлення опорних точок, за якими одержані скани орієнтуватимуться [4, 5].

Завданням камерального етапу є побудова на основі хмари точок 3D моделі об'єкта відповідної документації у вигляді плоских креслень.

Польові роботи сканування Оноківської ГЕС проводилися за допомогою лазерного сканера *Faro Focus 3D 120* (Рис. 5).

Технічні параметри цього сканера, а саме невеликий розмір (240×200×100мм), мала вага (5 кг) швидкість сканування – 122 або 244 тис. точок за секунду (в залежності від обраного режиму сканування), радіус дії 70 м, похибка визначення координат точок – ±2–3мм, роздільна здатність камери 70 мегапікселів, вертикальний та горизонталь-



ний крок сканування —  $0,009^\circ$  повністю відповідають потребам якісного та ефективного сканування інженерних споруд ГЕС.

Польові роботи з наземного лазерного сканування Оноківської ГЕС зводилися до вибору розташування, розміщення станцій стояння 3D сканера так, щоб забезпечити повне знімання екстер'єру електростанції на мінімально можливій відстані, щоб забезпечити щільність 3–4 точки на 1 кв. см. поверхні. Фактично було створено 20 станцій сканування екстер'єру ГЕС (Рис. 6). Крім того, для визначення товщини стін, було прокладено 2 станції сканування в середині будівлі ГЕС. Перепади висот між станціями сканування були у межах 10,5 м. Затрати часу на вимірювання з кожної із станцій складали від 5хв до 10хв, в залежності від обраних параметрів сканування. Ці параметри постійно змінювалися виконавцем, в залежності від відстані між приладом та поверхнею об'єкта.

В результаті 6-годинних робіт, було проведено повне знімання екстер'єру Оноківської ГЕС, що дозволило провести камеральні опрацювання одержаних даних для побудови 3D моделі електростанції (Рис. 7).

Побудова 3D моделі Оноківської ГЕС виконувалася в ПЗ Autodesk AutoCad 2017 з попереднім редагуванням хмари точок в ПЗ Autodesk ReCap 360.

Для моделювання елементів ГЕС, проводиться виділення окремої області хмари точок, яка відтворює обраний елемент. Після цього, виконується вписування у вибрані точки САД об'єкта певної форми. Наприклад, для створення огорожі електростанції, спершу робиться зріз в області встановлення залізного стовпчика. По цьому зрізу визначається діаметр стовпця. Далі формується циліндр з певним діаметром, який розміщений в середині зрізу залізного стовпця. Висота циліндра відповідає висоті стовпця огорожі (Рис. 8). Далі процедура повторюється для кожного елемента будівлі. На Рис. 9 представлено визначену модель сходів. При моделювання більш складних елементів виконується зливання кількох простих моделей в одну.

В результаті опрацювання даних лазерного сканування, відтворено частину Оноківської ГЕС у вигляді 3D моделі (Рис.10). Детальна модель Оноківської ГЕС доступна для перегляду за посиланням: <http://3dlaserscan.xyz/оноківська-гес.html>.

Лазерне сканування дозволяє істотно скоротити витрати на отримання точної і актуальної інформації про споруду, а також швидко і з високою точністю визначити фактичні розміри і реальний стан всіх будівельних конструкцій та устаткування, що монтується, накласти результати вимірювань на

проектну 3D модель об'єкта і виявити відхилення від проектних значень. Виконане наземне лазерне сканування Оноківської ГЕС може бути основою для ВІМ — інформаційного моделювання будівель. Згідно концепції ВІМ, кожна складова будівлі позиціонується, як окрема деталь, яка має певні характеристики та властивості. Таким чином, створена 3D модель ГЕС перетворюється у справжню базу даних, яка представлена не лише графічним відображенням елементів ГЕС, а й містить усю технічну інформацію про них. В результаті інвентаризація усієї інфраструктури споруди дозволяє швидко зорієнтуватися серед різноманітних елементів ГЕС та одразу знаходити їх характеристики, закладені в процесі створення ВІМ моделі. Отож, 3D модель може використовуватися не лише для графічного відображення споруди, а й служити в якості навігації по інвентаризаційним даним об'єкта, розташування яких визначене за матеріалами 3D сканування [6].

Зважаючи на складну інфраструктуру ГЕС, великі перепади рельєфу, наземне лазерне сканування ефективно застосовувати у комплексі із аерозніманням з БПЛА. Тому, для менш детального знімання території, з метою побудови цифрової моделі місцевості Оноківської ГЕС власне виконувалося аерознімання за допомогою БПЛА.

Окрім площинного знімання БПЛА можна використовувати для знімання лінійних споруд: ЛЕП, під'їзних автодоріг, залізничних колій. На основі такого знімання виготовивши ЦМР і ортофотоплан можна отримати багато інформації, а саме: координати та кількість опор, люків, зливних решіток, покриття, відбійників і т. д.; топографічну ситуацію прилеглої території до споруди; розміри споруди; площі заліснених ділянок; виявлення дерев що загрожують обривом ЛЕП при падінні. За окремими зніманнями можна візуально обстежити споруду на наявність дефектів (опор, ізоляції на опорах, відбійників, покриття, знаків, переїздів, лотків, узбічч і т. д.) без виїзду на об'єкт. На Рис. 11 на окремому аерознімку території Оноківської ГЕС можна простежити кількість ліній на опорах, їх стан, просторове положення опори відносно напрямку лінії.

Ще одним напрямком використання БПЛА це моніторинг берегових ліній водосховищ [8], з метою об'єктивного контролю ситуації, аналізу стану берегової лінії та прилеглої території на предмет забруднення деревиною та сміттям, або ж поступовою ерозією берегів. Проблема берегової ерозії та накопичення деревини і сміття є актуальною на водосховищі Теремле-Ріцької ГЕС.

З використанням БПЛА можливе складання технологічних карт що відображатимуть місця зосередження сміття і деревини (ерозії), на основі яких необхідно розробляти ефективні комплексні заходи для усунення цих проблем.



Рис. 11. Фрагменти сирих даних знімання Оноківської ГЕС.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. *Хоменко В.О.* Аналіз стану та перспективи розвитку малої гідроенергетики в Україні. Експлуатація малих ГЕС та каскадів малих ГЕС у сучасних умовах / В.О. Хоменко, П.Д. Лежнюк // Вісн. Вінниц. політехн. ін-ту. — 2012. — № 6. — С. 118–123.
2. *Поп С.С., Шароді І.С., Шароді Ю.В., Ганзел А.В.* Гідроенергетика Закарпаття: стан та перспективи розвитку / Поп С.С. // Укр. геогр. журнал. — 2015. — №2. — С. 65–71
3. *Плачкова С.Г.* Енергетика: історія, сучасність і майбутнє. [Електронний ресурс] / Плачкова С.Г.. — 2013. — Режим доступу до ресурсу: <http://energetika.in.ua/ua/books/book-5>.
4. *Вальдовский А., Хмелевский М., Есиновский В., Шакин И., Оверченко Е.* Технология лазерного сканирования и 3D-моделирования гидротехнических сооружений // Речной транспорт (XXI век). — 2010. — № 6.

5. *Навигационно-геодезический центр.* Сканирование Александровской ГЭС [Електронний ресурс] / Навигационно-геодезический центр. — 2010. — Режим доступу до ресурсу: <http://ngc.com.ua/info.php?page=scanGes>.

6. *Nesse A.* 3D Data Fusion for 3D Modeling Applications for The Energy Sector / Anders Nesse. // FIG Working Week 2016 Recovery from Disaster. — 2016.

7. *Митин М.Д.* Современные тенденции развития отрасли беспилотных летательных аппаратов / Митин М.Д., Никольский Д.Б. // ГЕОМАТИКА. — 2013. — №4. — С. 27–31.

8. *Жук А.Ю.* Использование беспилотных летательных аппаратов для оценки объёмов и распределения "бесхозной" древесины, находящейся в прибрежных акваториях и береговой зоне водохранилищ [Електронний ресурс] / Жук А.Ю. — Режим доступу до ресурсу: [http://www.science-bsea.bgita.ru/2014/les\\_komp\\_2014/juk\\_i](http://www.science-bsea.bgita.ru/2014/les_komp_2014/juk_i)

© Білак О.О., Третяк К.Р., Маліцький А.Ю., Шило Є.О., 2017

