

УДК 332.3:528.46:528.74:631.459

МОНІТОРИНГ ПРОСТОРОВИХ ПАРАМЕТРІВ РЕКУЛЬТИВОВАНИХ ЗЕМЕЛЬ ЗАСОБАМИ АЕРОФОТОЗНІМАННЯ

К. Мамонов, д. е. н.

ORCID ID: 0000-0002-0797-2609

Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова

В. Ковальчук, здобувач

ORCID ID: 0009-0007-1394-7008

Сумський національний аграрний університет

О. Горб, к. т. н.

ORCID ID: 0009-0009-0257-4941

Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова

<https://doi.org/10.31734/architecture2023.24.133>

Мамонов К., Ковальчук В., Горб О. Моніторинг просторових параметрів рекультивованих земель засобами аерофотознімання

Досліджуються можливості засобів аерофотознімання для виявлення невідповідностей між проектними рішеннями, визначеними робочим проектом землеустрою щодо рекультивації порушених земель, і фактичним станом елементів рекультивації на місцевості через певні проміжки часу. На прикладі доводиться необхідність моніторингу процесів, які відбуваються після рекультивації земель. Пропонуються сучасні технологічні рішення для розв'язання поставленої проблеми. Для визначення просторових параметрів об'єкта рекультивації пропонується використовувати аерофотознімання безпілотними літальними апаратами. Завдяки точній прив'язці до геодезичної мережі в різні періоди часу можна отримати просторову модель однієї й тієї ж місцевості і використовувати отримані моделі для таких вимірювань, як еродованість поверхні, відповідність проекту технічних заходів рекультивації, успішність реалізації біологічної рекультивації, об'єми змиву і наміву ґрунту, крутість схилів. Крім того, проілюстровано візуалізацію процесів моніторингу за допомогою різних програмних функцій спеціалізованого програмного забезпечення: ортофотоплани, карти висот, зміна горизонталей і площі трав'яної рослинності за циклами спостережень. На досвіді трьох циклів вимірювань з інтервалом в один рік визначено об'єми змитого ґрунту і їх залежність від задернованості земної поверхні. Ці параметри допомагають зробити висновки щодо успішності відновлювальних заходів у поєднанні з іншими методами оцінки стану ґрунтів – за необхідності відкоригувати проектні рішення, а також отримати науково обґрунтований досвід для впровадження в наступних виробничих проектах.

Ключові слова: моніторинг земель, рекультивація земель, ерозія ґрунтів, аерофотознімання, фотограмметрія.

Mamonov K., Kovalchuk V., Horb O. Monitoring of the spatial parameters of reclaimed land by means of aerial photography

The study is devoted to the possibilities of aerial photography to identify inconsistencies between project solutions determined by the working project of land management for reclamation of disturbed lands and the actual conditions of the elements of reclamation on the ground at certain intervals. The supplied example shows the need to monitor the processes that occur after land reclamation. Modern technological solutions are offered to solve the problem. To determine the spatial parameters of the reclamation object, it is proposed to use aerial photography by unmanned aerial vehicles. Due to the exact reference to the geodetic network in different periods, it is possible to obtain a spatial model of the same area and use the obtained models to measure soil erosion, compliance with the project of technical measures for reclamation, effectiveness of the implemented biological reclamation, volume of the soil inwashing and outwashing, steepness of the slopes. In addition, the work describes visualization of the monitoring processes by means of various functions of specialized software, namely orthophoto plans, elevation maps, change of horizontals, and area of grass vegetation by observation cycles. By using three cycles of measurements with one-year interval, the researchers determined volume of soil erosion and its dependence on the coverage of the ground's surface with grass vegetation. These parameters help to make decisions about efficiency of the land-reclamation work in combination with other methods of assessing soil conditions, and, if necessary, to correct the project solutions, as well as gain scientifically grounded experience for implementation in the following production projects.

Key words: land monitoring, land reclamation, soil erosion, UAV mapping, photogrammetry.

Постановка проблеми. Результатом проведення робіт з рекультивації порушених земель має бути земельна ділянка в стані, придатному для використання згідно з відповідним робочим проєктом рекультивації. Унаслідок порушення технології виконання робіт, непередбачених природних та антропогенних чинників земельна ділянка та її ґрунтовий покрив можуть не відповідати основним запроєктованим параметрам – геометричним (просторовим), біологічним, хімічним, механічним. До прикладу, результати будівельних робіт повинні контролюватись на всіх етапах, процеси ерозії ґрунту можуть відбуватися з моменту закінчення робіт, успішність біологічного етапу також потребує моніторингу впродовж певного часу.

Таким чином, постає проблема контролю здійснених заходів запобігання погіршенню стану земель.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питаннями моніторингу стану земель, прогнозування ерозійних процесів, рекультивації порушених земель присвячено велику кількість публікацій як у вітчизняних фахових виданнях, так і в закордонних.

Стосовно специфіки дослідження слід виокремити такі напрями, які певною мірою можуть вплинути на його хід:

- організаційно-правові аспекти рекультивації земель;
- моніторинг порушених і деградованих земель;
- технології проведення заходів, передбачених робочими проєктами землеустрою щодо рекультивації земель;
- можливості сучасних безпілотних технологій з погляду необхідної точності, наочності та ефективності.

Правові аспекти описано в статті [6], акцентовано увагу на необхідності вдосконалення законодавства щодо суспільних відносин у сфері рекультивації. Організаційно-правові засади проаналізовано у [8], наголошено на необхідності вдосконалення моніторингу і відповідних заходів для запобігання деградації земель.

Методику еколого-економічної оцінки якості відновлених земель запропоновано в [1].

У статті [3] окреслено загальні тенденції розвитку технологій безпілотних літальних апаратів (БПЛА), запропоновано їх класифікацію, акцентується увага на перспективності використання цієї технології в

локальних задачах. Питання точності аерофотознімання з БПЛА з геодезичними цілями висвітлені у [4; 9; 10]. Підтверджено можливість отримання сантиметрової точності результатів.

Фотограмметричні методи вимірювань ерозійних процесів досліджуються у [12; 13].

Дослідженням [2] проаналізовано можливість використання даних дистанційного зондування Землі з автоматичною класифікацією космічних зображень вільного доступу для визначення зміни земельних угідь і, як висновок, запропоновано надалі використовувати для цих цілей БПЛА.

Завдання дослідження. Для виявлення на рекультивованій земельній ділянці просторових невідповідностей відносно проєкту рекультивації, стабільності рекультивованої поверхні, наявності рослинності необхідно дослідити можливості сучасних технологій, а саме – використання аерофотознімання з БПЛА.

Виклад основного матеріалу. Моніторинг земель після їх рекультивації корисний для декількох сторін:

- розробника робочого проєкту землеустрою щодо рекультивації земель для підтвердження або корекції прийнятих проєктних рішень, отримання на підставі аналізу досвіду для майбутніх проєктів;
- розпорядника/власника земель – з метою підтвердження успішності процесу рекультивації й отримання актуальної інформації про стан земель;
- потенційного землекористувача/орендаря земельної ділянки – отримання інформації про стан і якість земельної ділянки.

Положенням про моніторинг земель локальний моніторинг визначено як такий, що виконується на окремих земельних ділянках та елементарних структурах ландшафто-екологічних комплексів. Основою ландшафту є земна поверхня, яка в разі проведення технічного етапу рекультивації є антропогенно сформованою і водночас повинна зберігати свою функцію екологічно стабільного елемента ландшафту.

Незалежно від реалізованого конкретним проєктом напряму рекультивації (сільськогосподарського, лісгосподарського, водогосподарського, рекреаційного, санітарно-гігієнічного, містобудівного тощо), необхідною умовою є просторова відповідність реалізованих заходів проєктним рішенням.

Чинниками, які визначають необхідну точність геометричних параметрів елементів рекультивациі в просторі, є:

- сучасні вимоги щодо точності ведення державного земельного кадастру;
- вплив геометричних характеристик на стабільність проєктних елементів (допуски ухилів поверхні, розміри укріплювальних елементів тощо);
- допуски санітарного і охоронного характеру.

Перелічені вимоги задовольняють сучасні геодезичні технології вимірювань, зокрема GNSS (Global Navigation Satellite System), наземні лінійно-кутові за умови допустимої точності прив'язки до державної геодезичної мережі, а також аерофотознімання.

Для задач оперативного контролю планового положення простих елементів рекультивациі аерофотознімання в багатьох випадках вимагатиме більше витрат порівняно з GNSS-зйомкою. Проте аерознімання дає більшу наочність, можливість отримання, у разі необхідності, додаткової метричної інформації без повторного виїзду на польові роботи.

Особливо привабливим з погляду точності та ефективності є поєднання GNSS та БПЛА [4; 9; 10]. У такому разі GNSS використовується для геодезичної прив'язки аерофотознімання, а БПЛА – як повітряна платформа фотографування. Саме ця технологія

використана для отримання польових матеріалів цього дослідження. Досліджуваною ділякою є частина колишнього глиняного кар'єра площею 0,55 га, що знаходиться в Сумській області. Ухили поверхні становлять від 8 градусів в південно-західній частині до 15 градусів у північно-східній. Для фотограмметричних вимірювань використані матеріали аерофотознімань, виконаних з періодичністю, близькою до одного року.

Наземні GNSS-спостереження виконано в RTK-режимі приймачем Topcon GRS-1 в мережі базових станцій System.NET. Аерофотознімання проведено квадрокоптером DJI Phantom 4pro з камерою 20 мегапікселів і з бортовим GNSS-приймачем PPK (Post-Processing Kinematic), як базову станцію використано приймач Topcon GRS-1, встановлений статично безпосередньо на об'єкті і прив'язаний до державної геодезичної мережі. Для висотної прив'язки слугували два нівелірні репери на відстанях 100–300 метрів. Середні квадратичні похибки визначення GNSS-векторів не перевищували 0,03 м відносно базової станції.

За результатами аерофотознімання отримані ортофотоплани, тривимірні хмари точок, також трансформовано знімки для можливості вимірювань у стереорежимі. Зведену інформацію про основні технічні характеристики аерофотознімання наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Основні характеристики матеріалів аерофотознімання

Цикл	Дата	Середня висота фотографування, м	Середня квадратична похибка моделі на опорних точках, м/пікселі	Роздільна здатність ортофото, см/пікс.	Точність карт висот, см/пікс.
1	11.2019	100	0,010 / 0,97	3,3	5,4
2	10.2020	70	0,017 / 0,60	1,8	3,6
3	11.2021	50	0,008 / 0,50	1,5	2,6

Отримані в програмному забезпеченні Agisoft Metashape карти висот наочно показують зміни структури поверхні в поєднанні з трав'яною рослинністю (рис. 1). Карти глибин при цьому отримані в режимі м'якої фільтрації з метою візуалізації трав'яної

рослинності. Якщо під час першого циклу спостережень поверхня була механічно спланована, ущільнена і не мала жодної рослинності, то в наступних циклах проявляються вегетаційні процеси і водна ерозія.

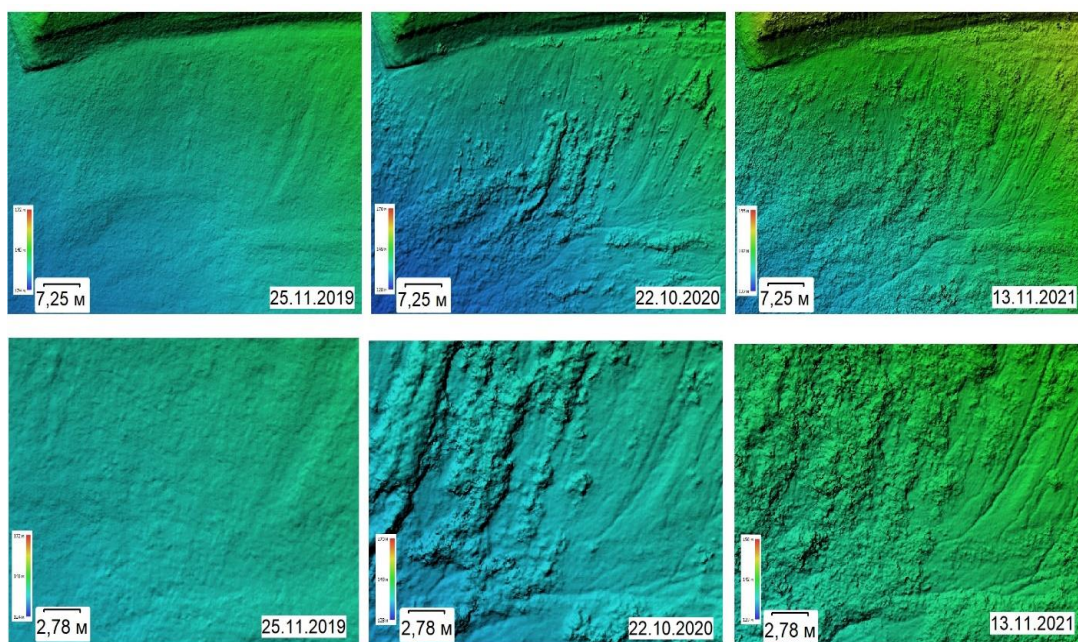


Рис. 1. Порівняльні карти висот на різних циклах спостережень

Іншим методом візуалізації просторових і біологічних процесів є складання ортофотопланів у звичайному для людського ока зображенні (рис. 2). За допомогою ортофотозображення відразу помітно одну з можливих причин ерозії ґрунту: родючий шар був частково змитий або ж неякісно нанесений на технічному етапі, що призвело в подальшому до відсутності рослинного покриття на цій ділянці.

У монографії [7, с. 361–363] описаний метод обліку змиву ґрунту за обмірюванням водорівчаків, який використовується для визначення ерозійних втрат ґрунту. Він передбачає

заміри ширини і глибини русла через певні інтервали (створи) з помилкою від 4 % для коротких рівчаків з великою кількістю створів до 48 % у протилежних умовах. Але такий метод не враховує можливий змив ґрунту з решти поверхні. Для дослідження комплексного підходу щодо визначення загальних втрат ґрунту, на наступному етапі необхідно побудувати цифрові моделі топографічної поверхні на кожному з циклів дослідження для визначення її змін у часі. Для цього можна використати просторову хмару точок або ж побудувати згладжену модель рельєфу способом горизонталей.



Рис. 2. Ортофотоплани досліджуваної ділянки

У разі використання 3D-хмари для автоматичного розрахунку об'єму земляних мас необхідно, щоб хмара точок максимально наближено описувала земну поверхню. Для цього необхідна процедура класифікації точок для відокремлення точок землі від інших.

У нашому випадку цей процес значно ускладнюється на другому і, особливо, на третьому циклах спостережень внаслідок наявності густої трав'яної рослинності. Тому виходом є оцифрування пікетів у точках, вільних від рослинності (рис. 3), і побудова по

них цифрової моделі рельєфу у вигляді нерегулярної триангуляційної сітки. Така сітка може використовуватись безпосередньо для розрахунків об'ємів земляних мас, ухилів поверхні, а також для побудови горизонталей. Горизонталі дають змогу проконтролювати коректність побудови поверхні методом візуального оцінювання їх форми. Особлива увага при сколці приділялася рівчикам та іншим структурним лініям, решту пікетів визначали в шаховому порядку з інтервалом до 10 метрів.

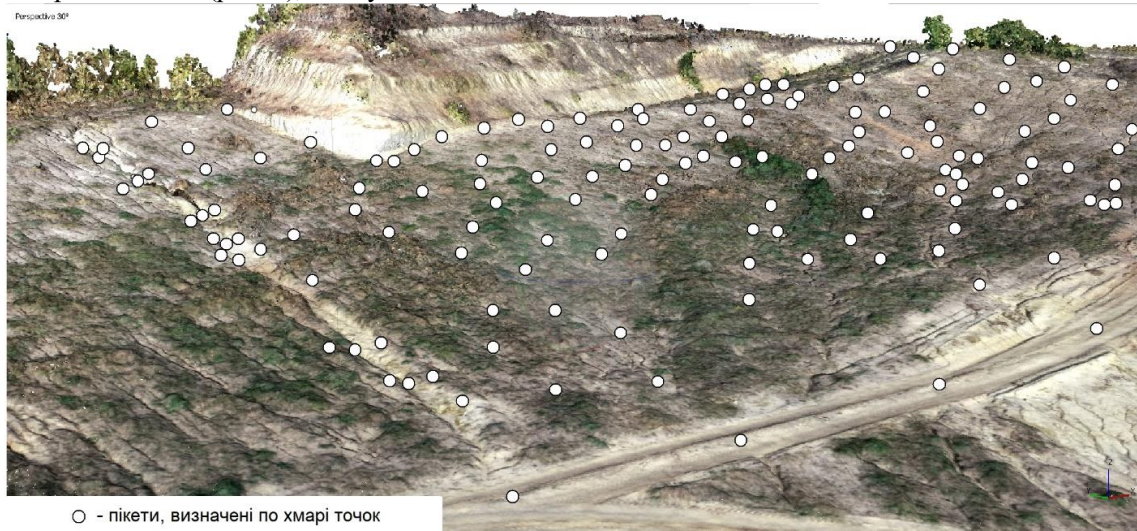


Рис. 3. Оцифрування пікетів за хмарою точок (перспективний вигляд)

Поверхневий змив ґрунту можливо проілюструвати методом накладення горизонталей різних років на одну планову основу (рис. 4). Таким чином можна наочно оцінити вертикальний напрям змін поверхні.

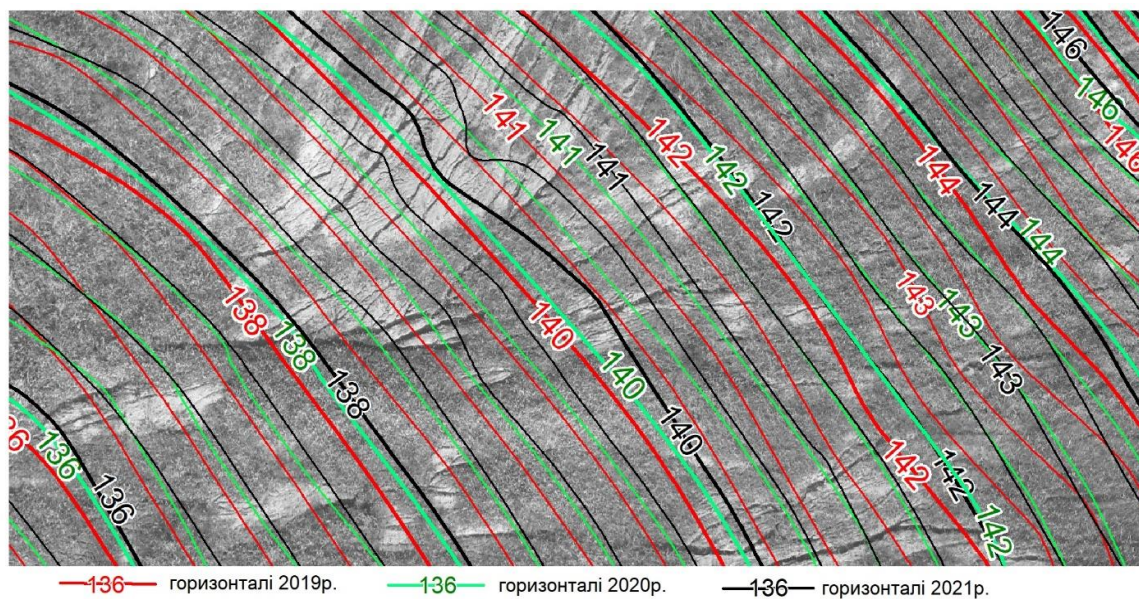


Рис. 4. Ілюстрація змиву ґрунту методом накладення горизонталей різних років (переріз 0,5 м, растрова підоснова 2021 року)

У такому випадку видно, що горизонталі переважно поступово зміщуються вгору по схилу в плановому положенні, отже, у цьому місці відбувається змив верхнього шару ґрунту. З іншого боку, частина горизонталей другого і третього циклів майже збігаються, що свідчить про стабілізацію схилу після укріплення трав'яною рослинністю.

На наступному етапі додано інформацію про динаміку площі рослинності (рис. 5) і

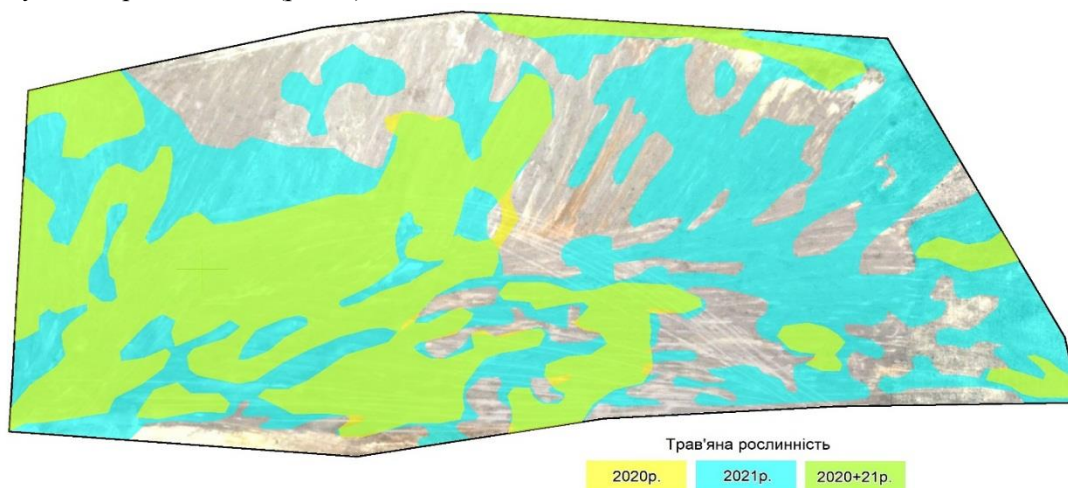


Рис. 5. Покриття трав'яною рослинністю за роками

Таблиця могла би бути доповнена значеннями об'ємів рівчаків. Але наслідком обмеженої видимості їх бортів на третьому циклі спостережень (причинами чого були густа рослинність, а також значна затіненість днищ рівчаків) стала неможливість якісного визначення їх розмірів за наявними фото-матеріалами. Технологічними прийомами для уникнення такої ситуації можуть бути:

- проведення аерофотознімання навесні, коли вплив трав'яного покриву мінімальний;
- підбір оптимальних погодних умов для м'якої фотоекспозиції (легка хмарність без глибоких тіней);
- запис фотографій у сирому форматі (без компресії);
- контрольні проміри класичними наземними методами.

- Таблиця 2

Деякі показники ерозійних процесів та рослинності

№	Назва показника	11.2019 р.	10.2020 р.	11.2021 р.
1	Площа ділянки, га	0,5500		
2	Площа трав'яної рослинності, га	0	0,1833	0,3930
3	Відсоток покриття трав'яною рослинністю від загальної площі	0	33%	72%
4	Зміна об'єму земляної маси відносно попереднього циклу спостережень, м ³	0	-962,3	+116,0
5	Середнє значення зміни відміток поверхні ділянки (відношення об'єм/площа), м	0	-0,174	+0,021

Висновки. Для виявлення змін рекультивованої поверхні виконані три цикли спостережень фотограмметричним методом. За результатами підтверджено кореляцію між задернованістю поверхні та об'ємами ерозії ґрунтів.

Таким чином, отримані результати дослідження доводять ефективність використання сучасних фотограмметричних методів для оперативного та довгострокового моніторингу рекультивованих земель на різних стадіях робіт.

Розглянута технологія аерофотознімання бюджетними БПЛА має такі переваги: оперативність, точність, наочність, гнучкість, відносно низька собівартість. Але є й деякі недоліки: проблемність створення моделі поверхні за наявності густої рослинності, вимогливість до умов фотографування за необхідності вимірювань рівчаків (унаслідок глибоких тіней на кінцевих зображеннях). У перспективі необхідно порівняти можливості аерофотознімання з іншими сучасними геодезичними технологіями при зйомці об'єктів рекультивації та їм подібних, а також скомбінувати їх.

Бібліографічний список

1. Галаган Т. І. Гірничотехнічний етап рекультивації порушених земель та його еколого-економічна оцінка. *Ґрунтознавство*. 2014. Вип. 15, № 1–2 (24). С. 81–88. doi: 10.15421/041408.
2. Глотов В., Бяла М. Моніторинг просторово-часових геодинамічних змін складу категорій земель на прикладі регіону міста Стебник за даними дистанційного зондування Землі. *Геодинаміка*. 2022. Вип. 1 (32). С. 5–15 doi: 10.23939/jgd2022.02.005.
3. Глотов В., Гуніна А. Аналіз можливостей застосування безпілотних літальних апаратів для аерознімальних процесів. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. 2014. Вип. 2. С. 65–70.
4. До питання розрахунку точності визначення координат точок під час аерофотознімання з безпілотних літальних апаратів / Р. В. Шульц, С. П. Войтенко, П. Д. Крельштейн, І. А. Маліна. *Інженерна геодезія*. 2015. Вип. 62. С. 124–135.
5. Кошель А. О., Колганова І. Г. До питання про розроблення робочих проектів землеустрою щодо рекультивації порушених земель. *Землеустрій, кадастр і моніторинг земель*. 2022. Вип. 4. С. 72–81. doi: 10.31548/zemleustriy2022.04.07.
6. Лісова Т. В. Рекультивація земель як основний захід їх відновлення. *Право і суспільство*. 2017. № 5, ч. 1. С. 119–125. URI: <https://dspace.nlu.edu.ua/jspui/handle/123456789/13062> (Last accessed: 05.05.2023).
7. Наукові та прикладні основи захисту ґрунтів від ерозії в Україні / С. А. Балюк та ін. Харків, 2010. 538 с.
8. Романко Р. М., Беспалько Р. І. Особливості моніторингу порушених і деградованих земель внаслідок впливу екзогенних геологічних процесів. *Екологічна безпека*. 2013. Вип. 1 (15). С. 45–48.
9. A Test on the Potential of a Low Cost Unmanned Aerial Vehicle RTK/PPK Solution for Precision Positioning / N. A. Famiglietti, G. Cecere, C. Grasso, A. Memmolo, A. Vicari. *Sensors*. 2021. № 21. doi: 10.3390/s21113882.
10. Quality Assessment of DSMs Produced from UAV Flights Georeferenced with On-Board RTK Positioning / G. Forlani, E. Dall'Asta, F. Diotri, U. Morra di Cella, R. Roncella, M. Santise. *Remote Sensing*. 2018. No 10 (2). doi: 10.3390/rs10020311.
11. Putting land to work: An evaluation of the economic effects of recultivating abandoned farmland / E. Corbelle-Rico, P. Sanchez-Fernandez, E. Lopez-Iglesias, S. Lago-Penas, J.-M. Da-Rocha. doi: 10.1016/j.landusepol.2021.105808.
12. Stöcker C., Eltner A., Karrasch P. Measuring gullies by synergetic application of UAV and close range photogrammetry – A case study from Andalusia, Spain. *CATENA*. 2015. Vol. 132. P. 1–11. doi: 10.1016/j.catena.2015.04.004.
13. Themistocleous K. The use of UAVs for monitoring land degradation. *Proc. SPIE 10428, Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications VIII*, 104280E (5 October 2017). doi: 10.1117/12.2279512.

Стаття надійшла 09.06.2023