



УДК 528.062:504.75(477.82)
<https://doi.org/10.53904/1682-2374/2024-26/5>

О.В. Прилуцький¹, В.В. Шаповал¹, А.А. Куземко^{2,1}

¹Біосферний заповідник "Асканія-Нова" імені Ф.Е. Фальц-Фейна НААН
вул. Метрологічна, 12, м. Київ, 03143 Україна

²Інститут ботаніки ім. М.Г. Холодного НАН України
вул. Терещенківська, 2, м. Київ, 01601 Україна

¹e-mail: oleh.prylutskyi@gmail.com

¹e-mail: shapoval_botany@ukr.net

²e-mail: anyameadow.ak@gmail.com

¹<https://orcid.org/0000-0001-5730-517X>

¹<https://orcid.org/0000-0003-0443-663X>

²<https://orcid.org/0000-0002-9425-2756>

ДООКУПАЦІЙНИЙ СТАН БІОТОПІВ БІОСФЕРНОГО ЗАПОВІДНИКА "АСКАНІЯ-НОВА": ІНВЕНТАРИЗАЦІЯ ТА КАРТУВАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ТА ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

Картування, біотопи, дистанційне зондування Землі, степ, Україна

ДООКУПАЦІЙНИЙ СТАН БІОТОПІВ БІОСФЕРНОГО ЗАПОВІДНИКА "АСКАНІЯ-НОВА": ІНВЕНТАРИЗАЦІЯ ТА КАРТУВАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ТА ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ. О.В. Прилуцький, В.В. Шаповал, А.А. Куземко. – Картування біотопів є необхідним складником оцінки стану природних екосистем. Втім, виконання цього завдання традиційними наземними методами вимагає значних людських та матеріальних ресурсів. Альтернативою є дистанційне картування біотопів з використанням супутникових знімків та алгоритмів їх класифікації. За умов війни і тимчасової окупації частини території України, дистанційне картування біотопів часто стає єдиноможливим методом отримання зрізу стану екосистем. Ми розробили класифікаційну схему біотопів території Біосферного заповідника "Асканія-Нова" (Херсонська область, Україна), що заснована на національній класифікації, з певними модифікаціями та уточненнями, враховуючи специфіку форм та режимів природокористування території. З використанням наземних даних, зібраних у межах заповідника за період, що передував тимчасовій окупації, та методів сегментації зображень і керованої класифікації на основі даних космічного апарату Sentinel-2 укладено детальні карти біотопів всієї території (зони заповідна, буферна та антропогенних ландшафтів). Показано, що домінуючими за площами типами були сільськогосподарські угіддя суцільного посіву (богарні та зрошувані), справжні різнотравно-типчакково-ковилові і типчакково-ковилові степи степової зони, перелоги, а також тимчасові солонуваті водойми у депресіях степової зони (поди). Поєднання безпосередніх супутникових даних з похідними метриками, що відображають фенологію рослинних угруповань, показало високу ефективність такого підходу в картуванні біотопів. Об'єктна та піксельна класифікації забезпечили однаково добрі результати, проте об'єктні методи дали змогу мінімізувати проблему інтерференції класів внаслідок помилок класифікації окремих пікселів (salt-and-pepper problem). Завдяки відкритим скриптам мовами програмування R та Python, що додаються до статті, метод може бути відтворено на будь-якій іншій території. Отримані карти можна вважати репрезентативним зрізом доокупаційного стану біотопів Біосферного заповідника "Асканія-Нова" та геопросторовою основою для подальшого їх моніторингу та фіксації змін.

PRE-OCCUPATION STATUS OF HABITATS IN THE BIOSPHERE RESERVE "ASKANIA NOVA": INVENTORY AND MAPPING USING REMOTE SENSING AND MACHINE LEARNING. O.V. Prylutskyi, V.V. Shapoval, A.A. Kuzemko. – Mapping habitats is an essential component of assessing the condition of natural ecosystems. However, accomplishing this task using traditional field methods requires extensive human efforts and financial resources. An alternative is remote habitat mapping using satellite imagery and classification algorithms. In the context of war and the temporary occupation of parts of Ukraine, remote habitat mapping often becomes

the only feasible method to obtain a snapshot of ecosystem conditions. We developed a habitat classification scheme for the territory of the Biosphere Reserve "Askania Nova" (Kherson region, Ukraine) based on the national classification system, with certain modifications and refinements that account for the land use forms and practices specific to that area. Using field survey data collected within the Reserve before the temporary occupation, combined with image segmentation methods and supervised classification of Sentinel-2 satellite data, we composed detailed habitat maps for the entire Reserve (including the natural core, buffer, and anthropogenic landscape zones). The results demonstrate that the prevalent habitat types include continuous croplands (both rainfed and irrigated), true forb-bunchgrass and bunchgrass steppes of the steppe zone, fallow or recently abandoned arable lands, and temporary saline wetlands in depressions of the steppe zone (pody). Integrating direct earth observation data with derived metrics reflecting the phenology of plant communities proved highly effective for habitat mapping. Object-based and pixel-based classifications provided equally fair results, although object-based methods minimised issues of class interference caused by misclassification of individual pixels (the "salt-and-pepper problem"). The open-source scripts in R and Python, provided as supplementary materials, ensure the reproducibility of this method in other areas. The resulting maps represent a reliable snapshot of the pre-occupation state of the Biosphere Reserve "Askania Nova" habitats and serve as a spatially explicit foundation for their future monitoring and change detection.

Об'єктивна оцінка перебігу природних процесів або динаміки змін в екосистемах потребує регулярної фіксації поточного стану екосистем, у тому числі біотопічного різноманіття (Alleaume et al., 2018). Виняткової актуальності це набуло з початком повномасштабного вторгнення російської федерації в Україну, адже виникла потреба оцінки не лише природних змін стану екосистем, а й оперативної детекції шкоди, спричиненої воєнними діями та окупацією частини території країни, що можливе лише при порівнянні вихідного стану екосистем зі станом, в якому вони опинилися після спричиненого впливу (Kuzemko et al., 2024; Myroniuk et al., 2024).

Оцінка біотопічного різноманіття з використанням наземного картування вимагає значних витрат часу та ресурсів (Hermosilla et al., 2022). Дефіцит кваліфікованих фахівців (в першу чергу, біологів) призводить до того, що наземне картування дотепер здійснювалося лише на обмежених територіях, переважно об'єктів природно-заповідного фонду (Guth, Kučera, 2005; Устименко, Климук, 2006; Дубина, Устименко, 2007; Abdulloeva, 2017; Спінова, 2021; Davydova, 2022). У більшості випадків ці трудомісткі та ресурсозатратні заходи відбуваються одноразово або повторюються із великим інтервалом (Ткаченко, Шаповал, 2010; Тищенко, Тищенко, Ткаченко, 2020). Тимчасова окупація, замінування, близькість до лінії бойового зіткнення роблять фактично недоступною для наземних досліджень значну частину території країни (Shevchuk, Vyshnevskiy, Bilous, 2022). Відтак актуальності набуває розвиток методів дистанційного картування біотопів із використанням даних супутникової зйомки, що дозволяє мінімізувати ризик для фахівців, масштабувати дослідження на великі території та проводити регулярні зрізи стану природних екосистем без залучення значних людських та матеріальних ресурсів (Matsala et al., 2024; Myroniuk et al., 2024).

У картуванні біотопів (або ширше: землекористування та класів поверхні, англ. land use / land cover mapping) на основі даних дистанційного зондування Землі (далі – ДЗЗ) здебільшого використовують методи машинного навчання та керованої піксельної класифікації, такі як "випадковий ліс" (англ. Random Forest: Ho, 1995), метод опорних векторів (англ. Support Vector Machine: Boser, Guyon, Vapnik, 1992) або дерева класифікації та регресії (англ. Classification and Regression Trees, CART: Breiman et al., 1984). Попри технічні відмінності, всі ці алгоритми засновані на принципі тренування класифікатора (калібрування моделі) на основі наявних даних (точок, для яких відома приналежність до певного типу біотопу), після чого класифікатор визначає приналежність кожного пікселя зображення до одного з класів тренувальних даних. Точність класифікації визначається на незалежній тестовій (валідаційній) вибірці наземних даних (Hengl et al., 2018).

Недоліком піксельної класифікації, на який звертають увагу, є те, що кожен піксель класифікується незалежно від пікселів-сусідів. Таким чином, може виникати ефект "солі з перцем" (англ. "salt-and-pepper problem") – навіть у межах однорідної ділянки виникають дрібні краплення, віднесені алгоритмом до іншого класу поверхні. Одним з можливих рішень є методи об'єктної класифікації, де спершу супутникове зображення розділяється

на компактні сегменти, що поєднують групи близьких за значеннями суміжних пікселів, а вже потім ці сегменти класифікуються за типами біотопів (Lucas et al., 2007; Dronova, 2015; Ruiz et al., 2021).

Документування екосистемного різноманіття сучасної території Біосферного заповідника "Асканія-Нова" імені Ф.Е. Фальц-Фейна НААН (далі – БЗ) було започатковане з першої половини ХХ століття у форматі крупномасштабного геоботанічного картування, що забезпечило різночасові зрізи просторового розподілу формацій та структурної диференціації рослинності асканійського степу (Десятова-Шостенко, 1928; Шалыт, 1938; Извекова, 1939, цит. за: Дмитриев, 1941; Короткова, 1964; Веденьков, Водопьянова, 1969; Веденьков, Веденькова, 1998; Веденьков, Ющенко, 1987; Шаповал, 2013). На сьогодні розроблено узагальнену (синтетичну) геоботанічну карту рослинності природного ядра БЗ, площею 11054 га, складену за матеріалами попередніх розрізнених зйомок цілини та перелогів, у масштабі 1:25000 (Шаповал, 2018). Окрім того, накопичено значний масив геоботанічних описів рослинності природного ядра та прилеглих перелогів буферної зони БЗ за період 1967–2019 рр. (Kuzemko, 2012; Shapoval, Skobel, Vasyliuk, 2024). На жаль, інформація по структурі рослинності та загалом біотопічному різноманіттю зон буферної та антропогенних ландшафтів БЗ обмежена. Існуючі карти землекористування забезпечують виключно рекогносцирувальну характеристику території.

Наразі БЗ знаходиться на тимчасово окупованій території, що унеможлиблює польові дослідження та власне отримання локальних наземних даних. Стан екосистем, у тому числі природного ядра, достеменно невідомий (за винятком впливу пожеж, викошувань, підтоплень та окремих видів біотехнічних і господарських робіт), водночас розробка детальної карти його біотопів має надзвичайно вагоме значення, насамперед як фіксація вихідного, тобто доокупаційного, їх стану та моніторингу подальших змін в умовах тимчасової окупації. Відтак ми поставили за мету створити карту біотопів БЗ, що охоплювала б усю територію об'єкта природно-заповідного фонду (33307 га, у т.ч. заповідна зона 11054 га, буферна зона 6909 га, зона антропогенних ландшафтів 15344 га) та відображала б його екосистемне різноманіття напередодні повномасштабного вторгнення російської федерації та окупації регіону. Цьому етапові логічно передувало укладання класифікаційної схеми біотопів території БЗ.

Матеріали та методи досліджень

На території БЗ зберігаються унікальні ландшафти, що історично поєднують природні та штучні екосистеми. Основу для розробки базової класифікаційної схеми біотопів БЗ становили багаторічні польові дослідження його території. Для ідентифікації біотопів було використано характеристики, наведені у Національному каталозі біотопів України (2018) з відповідними кодами й послідовністю розгляду, та окремі діагностичні уточнення відповідно до монографії "Біотопи степової зони України" (2020). Як і в Національному каталозі, термін "оселище" (англ. *habitat*) застосовується нами у розумінні Резолюції № 4 (1996; зі змінами) Бернської конвенції та Додатку I Оселищної директиви ЄС: біотоп – суходільна або водна ділянка, природна або напівприродна, що визначається за географічними, абіотичними та біотичними особливостями.

У 2024 р. ми започаткували картування біотопів всієї території БЗ (33307 га) з використанням наявних наземних даних, методів ДЗЗ та машинного навчання. Детальний технічний опис усіх етапів, разом зі скриптами для їх відтворення, наведено у репозиторії на GitHub (https://github.com/olehprylutskyi/askania-nova_habitat_map). Усі кроки здійснено з використанням середовища хмарних обчислень Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017) через Python API, а також локальних інструментів Python (Python Software Foundation, 2024) та R (R Core Team, 2024). Анотування сегментів та візуальну перевірку результатів виконано в настільній геоінформаційній системі QGIS (QGIS Development Team, 2024).

1. Підготовка даних дистанційного зондування.

За основу було взято знімки супутника Sentinel-2 Європейської космічної агенції, що мають роздільну здатність 10 м на піксель та частоту близько п'яти діб, доступні через каталог даних Google Earth Engine (далі – GEE, https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S2_SR_HARMONIZED). Умовами відбору знімків

були час зйомки (знімок зроблено в проміжку 1 березня – 31 жовтня, 2015–2021 рр.) та захмареність, не вища за 10% від загальної площі кожного знімка.

Далі було створено композитне багатоканальне зображення всієї території БЗ. Зображення включає медіани оптичних каналів B2, B3, B4, B8, B11, B12, що охоплюють діапазон частот від нижньої межі видимого світла до короткохвильового інфрачервоного, а також сезонну динаміку двох спектральних індексів – NDVI (нормалізована різниця червоного та ближнього інфрачервоного каналів, індикатор інтенсивності вегетації, Rouse et al., 1974) та NDWI (нормалізована різниця зеленого та ближнього інфрачервоного каналів, індикатор обводненості поверхні, McFeeters, 1996), розраховані окремо за кожним місяцем в діапазоні березень–жовтень. Таким чином, сформовано 22-канальне композитне зображення, що поєднує прямі дані відбивальності земної поверхні з даними про фенологію. Дане композитне зображення ми розглядаємо як цифровий геопросторовий відбиток варіювання природних умов території БЗ для періоду, що передував окупації.

2. Наземні дані про біотопи.

Навчальні дані, необхідні для керованої класифікації даних дистанційного зондування, створювали у два етапи. На першому було відібрано 1275 геоприв'язаних геоботаничних описів, що виконані на території БЗ та упорядковані в Ukrainian Grassland Database (Kuzemko, 2012). Описи, виконані до 2000 року, було виключено з аналізу як такі, що можуть не передавати сучасний стан біотопів. З використанням експертної системи EUNIS-ESy (Chytrý et al., 2020), для кожного опису було визначено тип біотопу за системою EUNIS. Позаяк експертна система поки не адаптована до розпізнавання типу X36 – депресії (поди) степової зони, який був уключений до Резолюції 4 Бернської конвенції, а відповідно і до системи EUNIS, за пропозицією України у 2019 році (EUNIS habitat classification 2012 – updated 2019 as regards two habitats, 2019), ми здійснили ідентифікацію цього типу вручну на основі наявності типових та діагностичних видів, а також експертної оцінки. Зрештою, для подальшого аналізу залишилося 753 точки, що належали до типів біотопів R1B (справжні степи) та X36 (поди) за класифікацією EUNIS.

Оскільки описи в абсолютній більшості приурочені до природного ядра БЗ та представляли лише два типи біотопів, дані щодо інших типів, поширених у зонах буферній та антропогенних ландшафтів, були створені вручну на основі супутникових знімків високої роздільності (Esri, 2024).

3. Класифікація композитного зображення.

З використанням алгоритму SNIC (Simple Non-Iterative Clustering: Achanta, Susstrunk, 2017; Tassi, Vizzari, 2020) виконано сегментацію композитного зображення. Параметри сегментації добивали ітеративно з метою домогтися отримання невеликих однорідних кластерів, що були б близькими до розмірів найменших за площею біотопів на території. У підсумку, було використано наступні параметри сегментації: $size = 10$, $compactness = 0.05$, $connectivity = 8$, відповідно до аргументів функції SNIC GEE (<https://developers.google.com/earth-engine/apidocs/ee-algorithms-image-segmentation-snic>).

Загалом 1664 з отриманих сегментів вручну атрибутовано відомостями про тип біотопу, спираючись на раніше підготовлені наземні дані, з використанням настільної геоінформаційної системи QGIS (QGIS Development Team, 2024).

На наступному кроці все сегментоване зображення було піддане керованій класифікації методом "випадкового лісу" (Random Forest), що є одним з найпоширеніших інструментів машинного навчання (Gislason, Benediktsson, Sveinsson, 2006; Abdi, 2020). З метою отримання навчальних даних для кожного сегменту спершу було розраховане медіанне значення кожного з каналів. Далі набір даних було розділено на навчальну (60%) та тестову (40%) вибірки, окремо для кожного з типів біотопів (стратифікований поділ). Такий підхід необхідний, щоб гарантувати пропорційну присутність усіх типів біотопів як у навчальних, так і в тестових даних. На навчальній вибірці було натреновано класифікатор Random Forest з 50 деревами; решта параметрів узяті типово для GEE (<https://developers.google.com/earth-engine/apidocs/ee-classifier-smilerandomforest>). Якість класифікації оцінено за передбаченням моделі для тестової вибірки, з розрахунком загальної точності передбачення (overall accuracy), коефіцієнту Каппа κ (Cohen's Kappa) та матриці переплутування між відомими та передбаченими моделлю значеннями (confusion matrix).

На наступному етапі калібровану модель було застосовано для класифікації всіх полігонів сегментованого зображення (результат – векторна карта з передбаченим типом біотопу для кожного полігону) та всіх пікселів початкового несегментованого зображення (результат – растрова карта з передбаченим типом біотопу для кожного пікселя).

Площі біотопів розраховували на обох отриманих картах. Для векторної карти загальну площу кожного з біотопів знаходили як суму площ полігональних сегментів, віднесених при класифікації до відповідного типу біотопу. Позаяк GEE, що використовувався як інструмент сегментації та класифікації, експортує результат у градусній системі координат WGS 84, перед обчисленням площ класифікованих сегментів було трансформовано в проєційовану систему координат WGS 84 / UTM Zone 36N. Всі операції виконували за допомогою функцій *st_transform* та *st_area* R-пакунку *sf* (Pebesma, 2018). Для растрової карти, що також була отримана у системі координат WGS 84, було спершу розраховано точну площу кожного пікселя за допомогою функції *cellSize* R-пакунку *terra* (Hijmans, 2024), після чого площі пікселів були підсумовані в межах кожного з типів біотопів.

Результати досліджень та їх обговорення

1. Різноманіття природних середовищ (екосистем) БЗ.

Класифікаційну схему біотопів БЗ наведено нижче:

В. КОНТИНЕНТАЛЬНІ ВОДОЙМИ ТА ВОДОТОКИ

В1 Постійні водойми

В1.1 Постійні прісноводні непроточні водойми з макрофітною рослинністю

- В1.1.2 Мезотрофні та евтрофні водойми з макрофітною рослинністю

EUNIS: C1.2 Permanent mesotrophic lakes, ponds and pools, C1.3 Permanent eutrophic lakes, ponds and pools.

Резолюція 4 Бернської конвенції: C1.32 Free-floating vegetation of eutrophic waterbodies, C1.33 Rooted submerged vegetation of eutrophic waterbodies.

Штучні постійні водойми зі стоячою водою або слабопроточні водотоки (арики) Великого Чапельського поду, що заживлюються з водозабірних свердловин, характеризуються мулистими донними відкладами з високим вмістом органічних та азотистих сполук. Біотоп репрезентують наводні, вільноплаваючі угруповання *Lemna minor* L. та *L. gibba* L., зрідка поширені по мілководдю; занурені, укорінені ценози *Potamogeton nodosus* Poir., *P. pusillus* L., *P. sarmaticus* Maemets, приурочені до глибших частин русел і днищ; насаджена група багаторічних водних рослин *Nymphaea alba* L. та *Nuphar lutea* (L.) Smith у ставку дендропарку.

- В1.3 Ділянки постійних непроточних водойм без вищої водної рослинності

EUNIS: C1.35 Plankton communities of eutrophic standing waters, C1.31 Benthic communities of eutrophic waterbodies.

Глибокі незарослі частини замулених штучних ставків та водотоків Великого Чапельського поду, зоопарку та дендропарку.

В2 Тимчасові водойми

В2.1 Тимчасові прісноводні водойми

- В2.1.1 Алювіальні ділянки та днища пересохлих водойм з однорічною земноводною рослинністю.

EUNIS: C3.51 Euro-Siberian dwarf annual amphibious swards.

Резолюція 4 Бернської конвенції: C3.51 Euro-Siberian dwarf annual amphibious swards (but excluding C3.5131 Toad-rush swards).

Низькорослі напівводні піонерні угруповання ефемерофітів (здебільшого) та нітрофільних рослин, що спорадично зустрічаються у підтоплених колях доріг та знижених місцинах, по мулистих берегах копанок та водопоїв, на мокрих і пересихаючих субстратах, поруч з відстійниками стічних вод, у калюжах, що наповнюються літніми дощами або водою, збіглою з прилеглих сільськогосподарських угідь. Розріджені фітоценози з участю *Alopecurus aequalis* Sobol., *Bidens tripartita* L., *Blitum glaucum* (L.) W.D.J. Koch, *Centaureum pulchellum* (Sw.) Druce, *Chaiturus marrubiastrum* (L.) Rchb., *Cyperus fuscus* L., *Echinochloa crus-galli* (L.) P. Beauv., *Mentha micrantha* (Fisch. & Benth.) Litv., *Persicaria lapatifolia* (L.) Delarbe, *P. maculosa* S.F. Gray, *Polygonum aviculare* L., *Potentilla anserina* L., *Psammophiliella*

muralis (L.) Ikonn., *Pulicaria vulgaris* Gaertn., *Rorippa austriaca* (Crantz) Besser, *Setaria pumila* (Poir.) Roem. & Schult., *Verbena supina* L., *Veronica anagalloides* Guss.

B2.2 Тимчасові солоні та солонуваті водойми

- B2.2.1 Тимчасові засолені водойми

EUNIS: E6.23 Central Eurasian solonchak grassland with *Crypsis*.

Резолюція 4 Бернської конвенції: C3.4 Species-poor beds of low-growing water-fringing or amphibious vegetation.

Обмежені за площею, фрагментарні біотоми у зонах періодичного розливу водотоків Великого Чапельського поду, приурочені до заглибин антропогенного походження, сильно витопані, пересихаючі, з ознаками засолення, характеризуються участю піонерних ефемерних рослин *Blitum glaucum*, *Crypsis alopecuroides* (Piller & Mitterp.) Schrad., *C. schoenoides* (L.) Lam., *Pholiurus pannonicus* (Host) Trin., тощо.

- B2.2.2 Тимчасові солонуваті водойми у депресіях степової зони (поди)

EUNIS: частково C1.6 Temporary lakes, ponds and pools, E2.5 Meadows of the steppe zone, E3.46 Continental humid meadows.

Резолюція 4 Бернської конвенції: X36 Depressions (pody) of the Steppe zone.

Гетерогенні ефемерні лучно-болотні, лучні та остепнені фітоценози у затоплених, пересихаючих та сухих подах природного ядра. Найбільші характерні і поширені по днищу Великого Чапельського поду. Рослинність даного типу приурочена до короткочасного періоду паводкових підтоплень (3–4 місяці), що спостерігаються з різною періодичністю; формується на специфічних осолоділих ґрунтах та глейосолах. Характеризується досить широкою екологічною амплітудою, з широким спектром гідроконтрастофільних рослин, здатних витримати засуху та різко наростити чисельність при короткочасному затопленні за рахунок підземних органів поновлення зі сплячими бруньками та/або насінневого банку діаспор. Глибина водойм (прісних та солонуватих) не перебільшує 30–40 см на піку затоплення у лютому–березні та стрімко спадає до середини літа. Характерні багаторічні та однорічні види, гідрофіти та гігромезофіти: *Achillea micranthoides* Klokov, *Allium regelianum* A. Becker ex Pjin, *Alopecurus pratensis* L., *Beckmannia eruciformis* (L.) Host, *Butomus umbellatus* L., *Damasonium alisma* Mill., *Elatine alsinastrum* L., *E. hungarica* Moesz, *Eleocharis palustris* (L.) Roem. & Schult., *E. uniglumis* (Link) Schult., *Elytrigia pseudocaesia* (Pacz.) Prokud., *Gratiola officinalis* L., *Inula britannica* L., *Juncus atratus* Krock., *Lotus angustissimus* L., *Lythrum thymifolia* L., *L. virgatum* L., *Middendorfia borysthenica* (M. Bieb. ex Schrank) Trautv., *Myosurus minimus* L., *Phalacrachena inuloides* (Fisch. ex Schmalh.) Pjin, *Phlomodios scythica* (Klokov & Des.-Shost.) Czerep., *Rorippa brachycarpa* (C.A. Mey.) Hayek та ін.

B3 Водотоки

- B3.3 Ділянки водотоків без вищої водної рослинності

Самобутні біотоми – канали та арики розгалуженої іригаційної мережі дендрологічного парку та зоопарку, що забезпечують регулярне зрошення; вузькі й неглибокі, з земляними бортами або обкладені бетонними плитами, гранітним і вапняковим каменем тощо. Вода зберігається лише на час роботи водозабірних свердловин, збігає самоплином та всмоктується у ґрунт в деревних насадженнях. Постійного водного дзеркала не формується, водна рослинність відсутня. Руслу здебільшого оголені, без замулу, подекуди (у щілинах плит) зарослі наземними бур'янистими рослинами.

B4 Прибережні біотоми

B4.1 Прибережні біотоми непроточних водойм та водотоків рівнин та низькогір'я

- B4.1.1 Прибережні та підтоплені ділянки з угрупованнями високих гелофітів

EUNIS: C3.2 Water-fringing reedbeds and tall helophytes other than canes.

Резолюція 4 Бернської конвенції: C3.2 Water-fringing reedbeds and tall helophytes other than canes.

Мілководні прибережні зони штучних водойм, копанок і водотоків Великого Чапельського поду та зоологічного парку, пожежні водозабори зі стоячою водою або слабопроточні, здебільшого замулені, рідше – з глинистим дном, флористично бідні, густо зарослі очеретом *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. Останній формує обширні монодомінантні зарості (ставки "Круглий" та "Глиняний"), його сухостій зберігається та перезимовує. Спорадично зустрічаються прибережні дрібні куртини *Typha latifolia* L., *T. angustifolia* L. та *Epilobium hirsutum* L.

- В4.1.4 Прибережні угруповання невисоких гелофітів на мулистих субстратах

EUNIS: C3.24 Medium-tall non-graminoid waterside communities.

Прибережні ділянки водотоків Великого Чапельського поду, зарослі гелофітами (повітряно-водними рослинами): *Alisma gramineum* Lej., *A. plantago-aquatica* L., *Bolboschoenus maritimus* (L.) Palla, *Butomus umbellatus*, *Carex melanostachya* M. Bieb. ex Willd., *Eleocharis palustris*, *Lycopus europaeus* L., *Sagittaria sagittifolia* L., *Schoenoplectus lacustris* (L.) Palla, *Ranunculus sceleratus* L., *Triglochin maritimum* L.

Т. ТРАВ'ЯНІ БІОТОПИ

Т1 Сухі трав'яні біотопи

Т1.4 Справжні різнотравно-типчаково-ковилові та типчаково-ковилові стеги

- Підтип Т1.4.а: Справжні різнотравно-типчаково-ковилові та типчаково-ковилові стеги степової зони

EUNIS: E1.2D Ponto-Sarmatic steppes.

Резолюція 4 Бернської конвенції: E1.2 Perennial calcareous grasslands and basic steppes.

Додаток I Оселищної Директиви: 62C0*Ponto-Sarmatic steppes; X18 Wooded steppe.

Фоновий біотоп, поширений по плакорних просторах асканійського степу, багаторічних перелогах та цілинних пасовищах з темно-каштановими залишково слабкосолонцюватими легкоглинистими ґрунтами у комплексі з солонцями степовими. Об'єднує зональні рослинні формації *Stipeta ucrainicae*, *Stipeta capillatae*, *Stipeta lessingiana*, опустелені ксероморфні фітоценози *Agropyreta pectinati*, типчатники *Festuceta valesiaca* з участю *Achillea nobilis* L., *A. setacea* Waldst. & Kit., *Allium paczoskianum* Tuzson, *A. guttatum* Steven, *Arenaria serpyllifolia* L., *Carduus uncinatus* M. Bieb., *Cerastium ucrainicum* Pacz. ex Klokov, *Chondrilla juncea* L., *Consolida paniculata* (Host) Schur., *Crepis ramosissima* D'Urv., *Cruciata pedemontana* (Bellardi) Ehrend., *Dianthus andrzejowskianus* (Zapal.) Kulcz., *Euphorbia seguieriana* Neck., *Falcaria vulgaris* Bernh., *Festuca valesiaca* Gaudin, *Galatella villosa* (L.) Rchb. f., *Hylotelephium stepposum* (Boriss.) Tzvelev, *Koeleria cristata* (L.) Pers., *Leymus ramosus* (Trin.) Tzvelev, *Limonium sareptanum* (A. Becker) Gams, *Linaria biebersteinii* Besser, *Linum austriacum* L., *Medicago romanica* Prodán, *Onosma polychroma* Klokov ex M. Pop., *Phlomis pungens* Willd., *Poa bulbosa* L., *Potentilla laciniata* Kit. ex Nestl., *P. argentea* L., *Rhaponticoides taliewii* (Kleopow) M.V. Agab. & Greuter, *Rindera tetraspis* Pall., *Salvia tesquicola* Klokov & Pobed., *Serratula erucifolia* (L.) Boriss., *Sisymbrium polymorphum* (Murray) Roth, *Tanacetum vulgare* L., *Taraxacum serotinum* (Waldst. & Kit.) Poir., *Trifolium diffusum* Ehrh., *Tulipa gesneriana* L. та ін.

З огляду на різний режим природокористування у біотопі даного типу (підтипу Т1.4.а), виділено 3 його варіанти:

- власне Т1.4.а, що репрезентує рослинність абсолютно заповідної сукцесійної серії у межах масивів "Південний" та "Північний" природного ядра, з індикаторними фітоценозами *Stipeta ucrainicae* та *Stipeta capillatae*;
- Т1.4.а-а, що утримується у фенісекціальному режимі (регулярні протипожежні прокоси у цілинному степу, викошувані степові галявини дендрологічного парку, багаторічні сінокісні перелоги у зонах буферній та антропогенних ландшафтів); загалом характеризується гетерогенним складом і об'єднує фітоценози з доміантною та едифікаторною роллю *Festuca valesiaca*, *Koeleria cristata*, *Bromopsis inermis* (Leyss.) Holub, *Poa angustifolia* L., *Elytrigia repens* (L.) Nevski;
- Т1.4.а-б, приурочений до цілинних площ з пасовищним режимом використання (сухі схили Великого Чапельського поду та пасовища громадської худоби), де поширені дигресійні фітоценози з участю *Artemisia austriaca* Jacq., *Euphorbia seguieriana*, *Eryngium campestre* L., *Kochia prostrata* (L.) Schrad., *Poa bulbosa*, *Salvia tesquicola*, *Tanacetum millefolium* (L.) Tzvelev тощо.

Ч. ЧАГАРНИКОВІ ТА ЧАГАРНИЧКОВІ БІОТОПИ

Ч4 Листопадні чагарники

- Ч4.1 Мезофільні і ксеромезофільні чагарники

EUNIS: F3.241 Central European subcontinental thickets.

Резолюція 4 Бернської конвенції: F3.241 Central European subcontinental thickets.
Зарості та куртини терену *Prunus spinosa* L. (моновидові здичавілі насадження).

- Ч4.2 Степові чагарники

EUNIS: F3.247 Ponto-Sarmatic deciduous thickets.

Резолюція 4 Бернської конвенції: F3.247 Ponto-Sarmatic deciduous thickets, X18 Wooded steppe.

Додаток I Оселищної Директиви: 40A0*Subcontinental Peri-Pannonic scrub, 40C0*Ponto-Sarmatic deciduous thickets.

Куртини мигдалю *Amygdalus nana* L., карагани *Caragana scythica* (Kom.) Pojark. та поодинокі кущі таволги *Spiraea × multiflora* Zabel, спорадично поширені на плакорах, окраїнах западин та водозбірних улоговин. У трав'яному ярусі зустрічаються *Artemisia austriaca*, *Bromopsis inermis*, *Dianthus lanceolatus* Steven ex Rchb., *Elytrigia trichophora* (Link) Nevski, *E. repens*, *Festuca valesiaca*, *Galatella villosa*, *Galium ruthenicum*, *Goniolimon tataricum*, *Koeleria cristata*, *Leymus ramosus*, *Limonium sareptanum*, *Phlomis pungens*, *Poa angustifolia*, *Seseli tortuosum* L., *Stipa capillata*.

- Ч4.3 Нітрофільні остепнені біотопи високих чагарників

EUNIS: F3.24 Subcontinental and continental deciduous thickets.

Зарості *Acer negundo* L., *Crataegus* spp., *Lycium barbatum* L., *Morus alba* L., *Rosa canina* L., *Sambucus nigra* L., *Ulmus pumila* L., що формуються у порушених, засмічених місцинах, на покинутих дачних ділянках, перелогах, прилеглих до лісосмуг тощо.

Д. ЛІСОВІ БІОТОПИ

Д1 Листяні ліси

- Д1.8 Антропогенні широколистяні ліси

EUNIS: G1.C Highly artificial broadleaved deciduous forestry plantations, G5.1 Lines of trees.

UkrBiotop: I:4.111 Штучно створені біотопи листяних дерев, I:4.23 Алеї дерев.

Лісосмуги та культури аборигенних видів дерев у невідповідних їм умовах: *Robinia pseudoacacia* L., *Acer negundo*, *Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle, *Cotinus coggygria* Scop., *Elaeagnus angustifolia* L., *Fraxinus pennsylvanica* Marshall, *Gleditsia triacanthos* L., *Populus deltoides* Marshall, *Prunus armeniaca* L., *Quercus robur* L., *Q. rubra* L., *Syringa vulgaris* L., *Salix alba* L., *Ulmus pumila* тощо. Стан і збереженість лісосмуг різні.

С. СІНАНТРОПНІ БІОТОПИ

С1 Рудеральні біотопи

С1.1 Рудеральні біотопи однорічників та малорічників

- С1.1.1 Біотопи однорічних ксерофітних злаків на узбіччях та покинутих землях

EUNIS: E1.6 Subnitrophilous annual grassland, E1.D Unmanaged xeric grassland, E1.E Trampled xeric grasslands with annuals, I1.52 Fallow un-inundated fields with annual weed communities.

UkrBiotop: I:2.13 Біотопи малорічних ксерофітних угруповань злаків.

Угруповання початкових стадій демутації, поширені по узбіччях доріг, у населених пунктах, на закинутих сільгоспугіддях, збоях, часто вузькими смугами чи латками з участю *Aegilops cylindrica* Host, *Anisantha tectorum* (L.) Nevski, *Bromus japonicus* Thunb., *B. squarrosus* L., *Eragrostis minor* Host, *Hordeum murinum* L., *Setaria viridis* (L.) P. Beauv.

- С1.1.2 Біотопи рудеральних малорічників на бідних ґрунтах

EUNIS: E1.D Unmanaged xeric grassland, E5.1 Anthropogenic herb stands, I1.52 Fallow un-inundated fields with annual weed communities.

UkrBiotop: I:2.1 Біотопи малорічників рудеральних угруповань та покинутих земель.

Угруповання одно- та дворічників на нещодавно порушених відкритих ділянках з помірно поживними чи бідними ґрунтами, як початкові стадії вторинної сукцесії в межах населених пунктів, вздовж доріг, по випасах, збоях, днищах сухих водонакопичувачів тощо (*Amaranthus albus* L., *A. retroflexus* L., *Ambrosia artemisiifolia* L., *Berteroa incana* (L.) DC., *Draba verna* L., *Capsella bursa-pastoris* (L.) Medik., *Erigeron canadensis* L., *Descurainia sophia* (L.) Webb ex Prantl, *Echium vulgare* L. *Kochia scoparia* (L.) Schrad., *Lactuca serriola* L.,

Lamium amplexicaule L., *Lepidium ruderales* L., *Onopordum acanthium* L., *Poa compressa* L., *Portulaca oleracea* L., *Tripleurospermum inodorum* (L.) Sch. Bip.

- C1.1.3 Біотопи нітрофільних рудеральних малорічників

EUNIS: E5.1 Anthropogenic herb stands, I1.52 Fallow uninundated fields with annual weed communities.

UkrBiotop: I:2.11 Біотопи малорічників нітрофільних рудеральних угруповань.

Антропогенні угруповання з переважанням однорічників на багатих ґрунтах; формуються поблизу людських поселень та ферм, по смітниках та звалищах, кагатах гною тощо (*Atriplex patula* L., *A. sagittata* Borkh., *A. tatarica* L., *Chenopodium album* L., *C. polyspermum* L., *Cyclachaena xanthifolia* (Nutt.) Fresen, *Kali tragus* Scop., *Kochia scoparia* (L.) Schrad., *Malva pusilla* Smith).

C1.2 Рудеральні біотопи багаторічників

- C1.2.1 Рудеральні біотопи багаторічних трав на бідних ґрунтах

EUNIS: E1.D Unmanaged xeric grassland, E5.1 Anthropogenic herb stands, I1.53 Fallow uninundated fields with annual and perennial weed communities.

UkrBiotop: I:2.21 Рудеральні біотопи багаторічників.

Рудеральні і напіврудеральні посухостійкі угруповання гемікриптофітів, з високим проективним покриттям, ярусною структурою, з численними заносними видами. Поширені вздовж доріг, зріджених лісосмуг, на вигонах. Репрезентують перші етапи сукцесії на антропогенних субстратах при постійному антропогенному навантаженні (*Artemisia absinthium* L., *Centaurea diffusa* Lam., *Cichorium intybus* L., *Daucus carota* L., *Falcaria vulgaris*, *Marrubium peregrinum* L., *Melilotus albus* Medik., *Melilotus officinalis* (L.) Pall., *Peganum harmala* L., *Poa angustifolia*, *Reseda lutea* L., *Xanthium albinum* (Widder) H. Scholz).

- C1.2.2 Рудеральні біотопи багаторічних трав нітрофільного типу

EUNIS: E5.1 Anthropogenic herb stands, E5.43 Shady woodland edge fringes, I1.53 Fallow uninundated fields with annual and perennial weed communities.

UkrBiotop: I:2.22 Мезофітні трав'яні рудеральні біотопи нітрофільного типу.

Рудеральні угруповання, сформовані переважно високорослими видами, приурочені до засмічених місцин у населених пунктах, узбіч доріг, звалищ, уздовж стін та загорож при затіненні, подекуди у куртинах дендропарку (*Arctium lappa* L., *Ballota nigra* L., *Cannabis ruderalis* Janisch., *Chelidonium majus* L., *Conium maculatum* L., *Dactylis glomerata* L., *Galium aparine* L., *Rumex crispus* L., *Urtica dioica* L.).

C2 Культивовані біотопи

C2.1 Сільськогосподарські угіддя

- C2.1.1 Угіддя культур суцільного посіву

EUNIS: I1.1 Intensive unmixed crops.

UkrBiotop: I:1.11 Агробіотопи сегетального типу зернових культур.

Поля сільськогосподарських культур суцільного посіву: зернові і технічні культури, різною мірою забур'янені (*Buglossoides arvensis* (L.) I.M. Johnst., *Centaurea diffusa*, *Chenopodium album*, *Cirsium arvense* (L.) Scop., *Consolida orientalis* (J. Gay ex Gren. & Godr.) Schroedinger, *Convolvulus arvensis* L., *Descurainia sophia*, *Echinochloa crus-galli*, *Papaver rhoeas* L., *Setaria glauca*, *S. viridis*, *Sonchus arvensis* L., *Sonchus oleraceus* L., *Tripleurospermum inodorum*). У складі даного типу агробіотопу на території БЗ виділено 2 різні варіанти:

- C2.1.1-а незрошувані (богарні) землі;
- C2.1.1-б зрошувані угіддя.

- C2.1.2 Просапні культури трав'янистих рослин

EUNIS: I1 Arable land and marked gardens.

UkrBiotop: I:1.12 Агробіотопи сегетального типу просапних культур.

Посіви просапних культур з досить широкими міжряддями та періодичним механічним оброботком ґрунту, часто забур'янені (*Amaranthus albus*, *A. blitoides* S. Watson, *A. retroflexus*, *Atriplex oblongifolia* Waldst. & Kit., *Chenopodium album*, *Cirsium setosum* (Willd.) Besser ex M. Bieb., *Convolvulus arvensis*, *Fumaria vaillantii* Loisel., *Setaria viridis*).

- C2.1.3 Просапні культури дерев, чагарників та чагарникових ліан

EUNIS: I2 Cultivated areas og gardens and pakrs.

UkrBiotop: I:1.12 Агробіотопи сегетального типу просапних культур.

Просапні агрофітоценози сегетальної рослинності, що формуються на виноградниках та у садах (дачі) у зонах буферній та антропогенних ландшафтів, забур'янені.

- C2.1.5 Чистий пар та свіжі перелоги

EUNIS: I.1.5 Bare tiled, fallow or recently abandoned arable land.

Поля сівозмін, не зайняті посівами сільгоспкультур, що утримуються в чистому від бур'янів стані. Молоді забур'янені перелоги, виведені з обробітку, на ініціальній стадії постексараційної сукцесії. Домінують *Anisantha tectorum*, *Bromus squarrosus*, *Buglossoides arvensis* (L.) I.M. Johnst., спорадично *Rhaponticum repens* (L.) Hidalgo).

C2.2 Декоративні культивовані біотопи

- C2.2.1 Парки та сквери

EUNIS: I2 Cultivated areas of gardens and parks.

UkrBiotop: I:4.2 Декоративні та плодові насадження (сади, парки).

Дендропарк "Асканія-Нова" та інші штучні деревні біотопи у населених пунктах.

- C2.2.2 Газони

UkrBiotop: I3.13 Декоративні штучні біотопи (газони та клумби).

Біотоп характерний для газонних покриттів в межах населених пунктів, відкритих лучних галявин дендропарку, викошуваних узбіч доріг та площ, що періодично виоптуються (стадіони).

- C2.2.3 Квітники (клумби, плантації квітів, садові центри)

EUNIS: I2.11 Park flower beds, arbours and shrubbery.

UkrBiotop: I.5.2 Клумби декоративних видів рослин, альпінарії.

Біотоп об'єднує декоративні недеревні насадження малого розміру у дендропарку та населених пунктах, недавно занедбані декоративні і присадибні недеревні насадження.

C3 Селітебні біотопи і технотопи

- C3.1 Будівлі

EUNIS: J1 Buildings of cities, towns and villages, J2 Low density buildings.

Постійні наземні споруди житлового, громадського, виробничого та іншого призначення.

- C3.2 Ділянки зі штучним твердим покриттям

EUNIS: J4 Transport networks and other constructed hard-surfaced areas.

Дороги, площі, майданчики, тротуари та інші території, вкриті асфальтом, бетоном, бруківкою тощо.

- C3.6 Звалища сміття та твердих відходів

EUNIS: J6 Waste deposits.

Полігони для твердих побутових відходів, несанкціоновані звалища.

C4 Виразно неприродні водойми та пов'язані з ними структури

EUNIS: J5 Highly artificial man-made waters and associated structures.

UkrBiotop: I:6 Штучні водні споруди.

Біологічні ставки очисних споруд з сильно забрудненою водою.

Загалом нам вдалося ідентифікувати на території БЗ 29 типів біотопів нижчого (3–4) рівня ієрархії (Національний каталог..., 2018). Попри значну кількість антропогенно-трансформованих та штучних біотопів, територія БЗ характеризується присутністю ряду рідкісних типів, що знаходяться під загрозою зникнення і потребують охорони. Зокрема, 11 типів біотопів БЗ занесені до Резолюції 4 Бернської конвенції.

2. Картування біотопів БЗ.

На основі класифікаційної схеми біотопів, з використанням геопозиціонованих наземних даних про розташування біотопів та даних супутникової зйомки Sentinel-2, шляхом сегментації зображення та його наступної керованої класифікації було отримано векторну карту біотопів території БЗ станом на кінець 2021 р. (рис. 1), яка включала 18 типів. Крім того, ми виконали піксельну класифікацію композитного зображення (рис. 2), що є традиційним методом картування біотопів за даними ДЗЗ, та наводимо її для порівняння з об'єктною. Якість передбачення моделі, перевірена на тестовій вибірці, була дуже високою (рис. 3); загальна точність складала 0,99, коефіцієнт Каппа $\kappa = 0,99$.

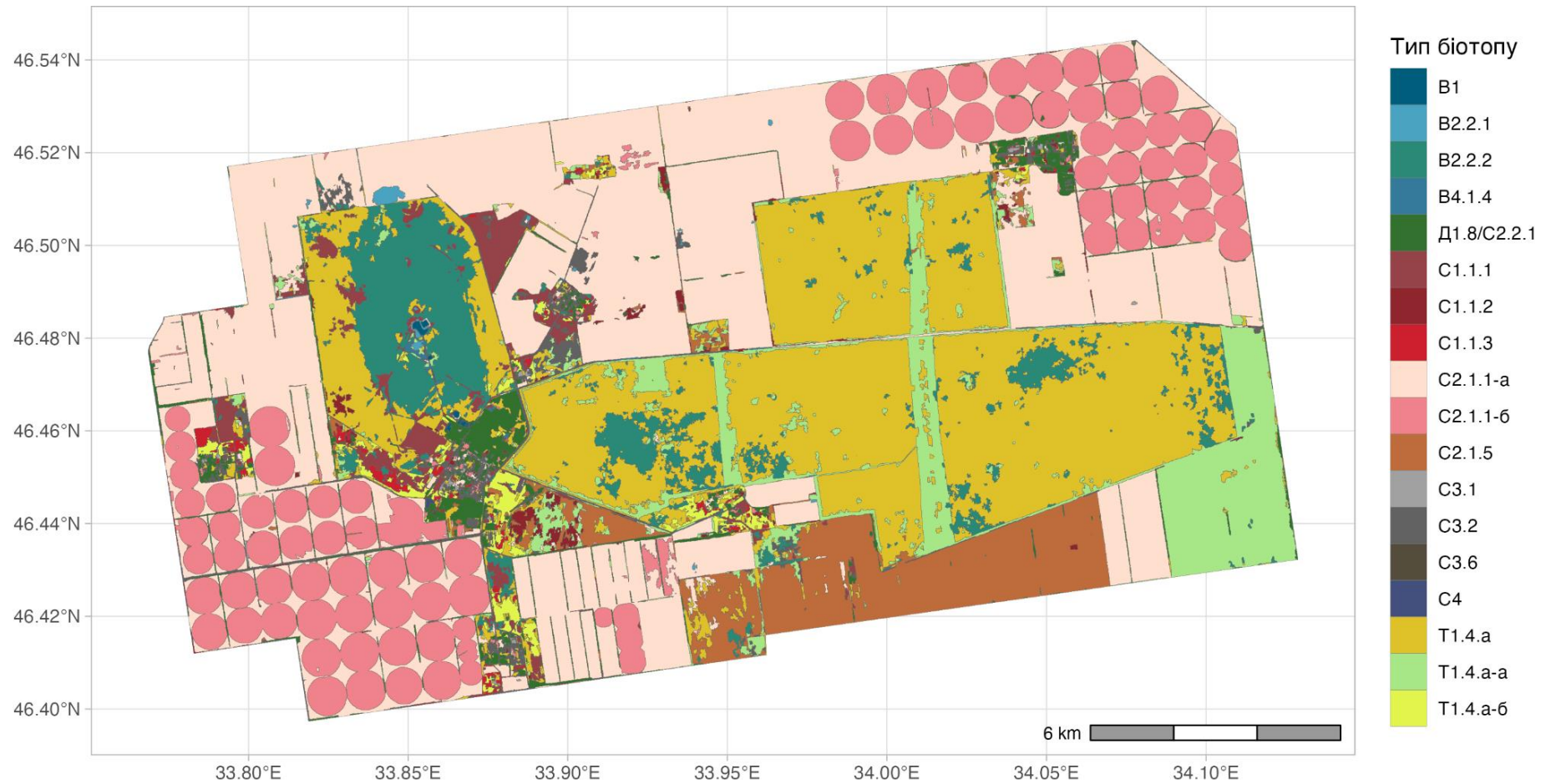


Рисунок 1. Карта біотопів БЗ за результатами об'єктної керованої класифікації сегментованого композитного зображення на основі даних Sentinel-2.

Figure 1. Habitat map of the Falz-Fein Biosphere Reserve "Askania Nova", as a result of object-based supervised classification of a segmented composite image based on Sentinel-2 data.

Інтерактивну карту можна переглянути за посиланням / An interactive map can be viewed at the link:

<https://ee-olegpril12.projects.earthengine.app/view/askania-nova-habitats>

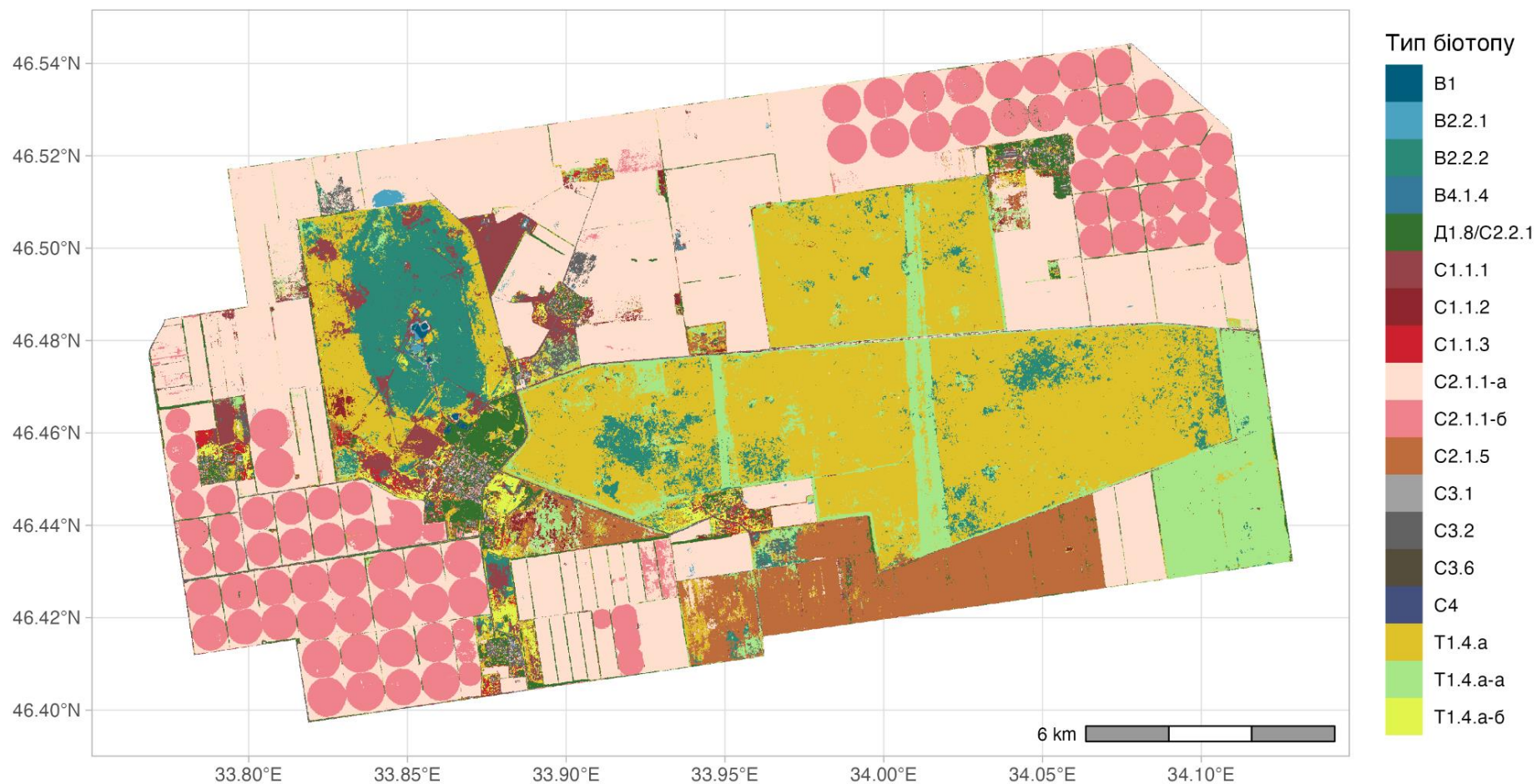


Рисунок 2. Карта біотопів БЗ за результатами піксельної керованої класифікації композитного зображення, створеного на основі даних Sentinel-2.
Figure 2. Habitat map of the Falz-Fein Biosphere Reserve "Askania Nova", obtained using pixel-based supervised classification of a composite image created using Sentinel-2 data.

Інтерактивну карту можна переглянути за посиланням / An interactive map can be viewed at the link:
<https://ee-olegpril12.projects.earthengine.app/view/askania-nova-habitats>

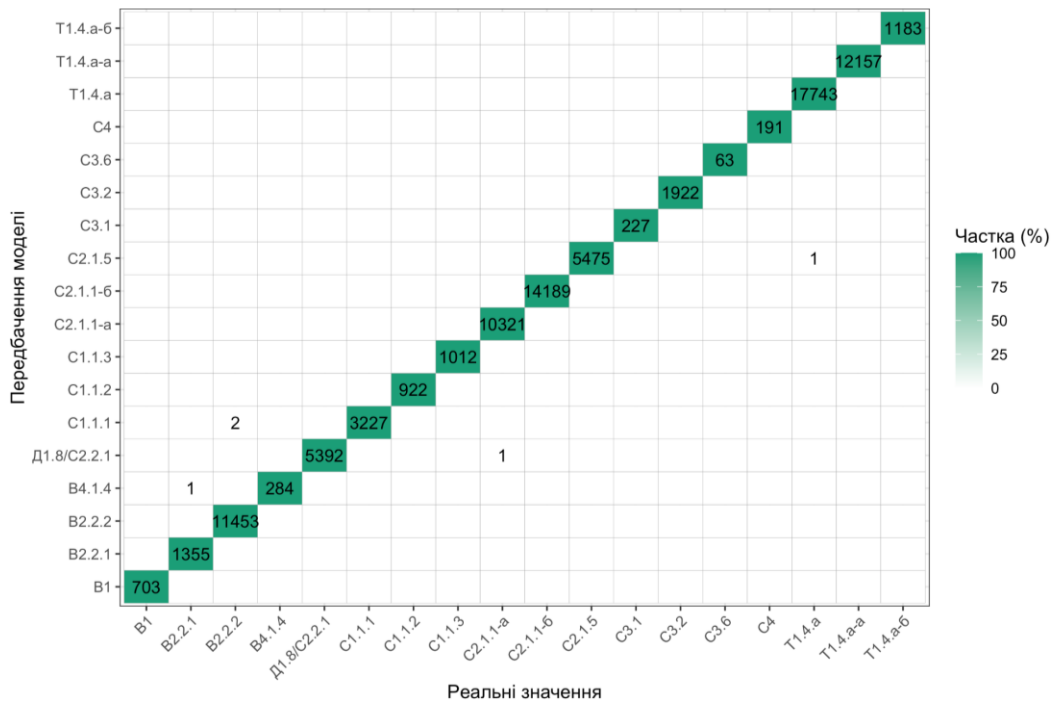


Рисунок 3. Матриця переплутування (confusion matrix) для тестової вибірки (40% від усіх наземних даних). Цифри позначають кількість пікселів знімка у тестовій вибірці для відповідного типу біотопу, колір – частку від загальної кількості пікселів цього класу у тестовій вибірці.

Figure 3. Confusion matrix for the test sample (40% of all ground truth data). The numbers indicate the number of pixels in the test sample for the corresponding habitat type, while the colours represent the proportion of the total number of pixels for that class in the test sample.

Більшу частину території (10,6 тис. га) займали незрошені (богарні) сільськогосподарські угіддя суцільного посіву – тип C2.1.1-a (рис. 4). Значними також були площі, що займали справжні різнотравно-типчаково-ковилкові та типчаково-ковилкові степи степової зони, які ми розділили на підтипи T1.4.a та T1.4.a-a, зрошені угіддя суцільного посіву (C2.1.1-б), чистий пар та свіжі перелоги (C2.1.5) і тимчасові солонуваті водойми у депресіях степової зони, поди (B2.2.2). Докладну інформацію про площі біотопів наведено у супровідній таблиці 1.

Загалом, підсумовані площі біотопів були дуже близькими, втім дещо відрізнялися залежно від способу класифікації (див. табл. 1, рис. 5). Піксельна класифікація трохи завищує площі агроценозів порівняно з площами природних (особливо трав'яних) біотопів. Ми припускаємо, що причиною може бути ефект, відомий як "сілі з перцем": окремі пікселі помилкових класів вкраплюються в території, зайняті іншими класами (Dronova, 2015). Причиною цього явища є те, що кожен піксель класифікується незалежно від своїх сусідів, виключно за власними спектральними ознаками (Ruiz et al., 2021). Сільськогосподарські угіддя суцільного посіву належать до тих типів біотопів, що трапляються виключно у вигляді суцільних масивів, і їх вкраплення площею в один-два пікселі за межами цих масивів є, найімовірніше, результатом помилки класифікації. Об'єктна класифікація, навпроти, враховує пікселі-сусіди при формуванні сегментів, відтак мінімізує помилкове проникнення таких типів біотопів у невластиві їм ділянки (Dronova, 2015). Водночас для біотопів, що займають малі площі та чиї межі не підтримуються штучно, піксельна класифікація може надавати точнішу оцінку площі. Однак, на території БЗ такі типи сукупно займають невеликі площі.

Ключовою перевагою використаного нами підходу є поєднання сегментації зображень з керованою класифікацією. Сегментація прискорює створення навчальних даних завдяки швидкому перетворенню точок з відомим типом біотопу на полігони, що повторюють однорідні зі спектральними ознаками ділянки поверхні й часто збігаються з

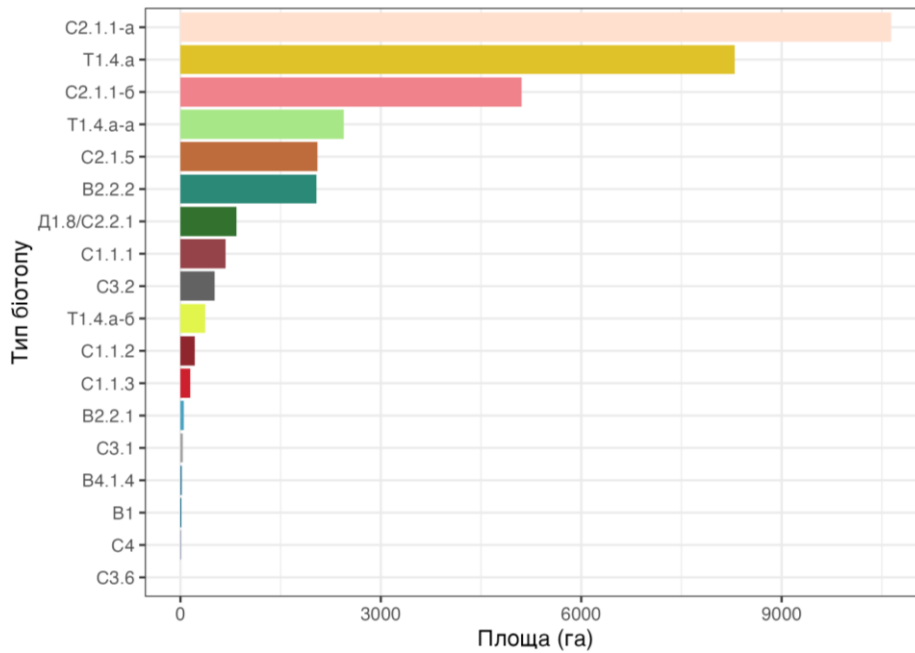


Рисунок 4. Співвідношення типів біотопів БЗ за площами (обчислені на класифікованому сегментованому зображенні).

Figure 4. Areas of habitat types of Falz-Fein Biosphere Reserve "Askania Nova" (areas were calculated based on the classified segmented image).

Таблиця 1. Сукупні площі (га) біотопів БЗ, обчислені за допомогою об'єктної та піксельної класифікації

Table 1. Total areas (ha) of habitat types of the Falz-Fein Biosphere Reserve "Askania Nova" calculated from object-based and pixel-based classification

Тип біотопу	Тип класифікації	
	об'єктна	піксельна
V1 Постійні водойми	15.65	16.13
B2.2.1 Тимчасові засолені водойми	47.8	53.76
B2.2.2 Тимчасові солонуваті водойми у депресіях степової зони (поди)	2037.03	1982.45
B4.1.4 Прибережні угруповання невисоких гелофітів на мулистих субстрахах	23.31	23.21
Д1.8 / C2.2.1* Антропогенні широколистяні ліси / Парки та сквери	840.35	859.87
C1.1.1 Біотопи однорічних ксерофітних злаків на узбіччях та покинутих землях	673.51	775.82
C1.1.2 Біотопи рудеральних малорічників на бідних ґрунтах	212.12	214.04
C1.1.3 Біотопи нітрофільних рудеральних малорічників	149.64	178.11
C2.1.1-a Угіддя культур суцільного посіву незрошувані (богарні)	10637.02	10665.57
C2.1.1-б Угіддя культур суцільного посіву зрошувані	5107.44	5127.62
C2.1.5 Чистий пар та свіжі перелоги	2052.57	2051.51
C3.1 Будівлі	34.61	41.34
C3.2 Ділянки зі штучним твердим покриттям	511.8	490.41
C3.6 Звалища сміття та твердих відходів	1.79	7.25
C4 Виразно неприродні водойми та пов'язані з ними структури	5.24	4.57
T1.4.a Справжні різнотравно-типчакково-ковилові та типчакково-ковилові степи степової зони	8293.65	8213.64
T1.4.a-a -- з сінокісним режимом використання	2442.74	2494.34
T1.4.a-б -- з пасовищним режимом використання	372.94	317.78

Примітка: * – дані типи біотопів система не ідентифікувала як окремі.

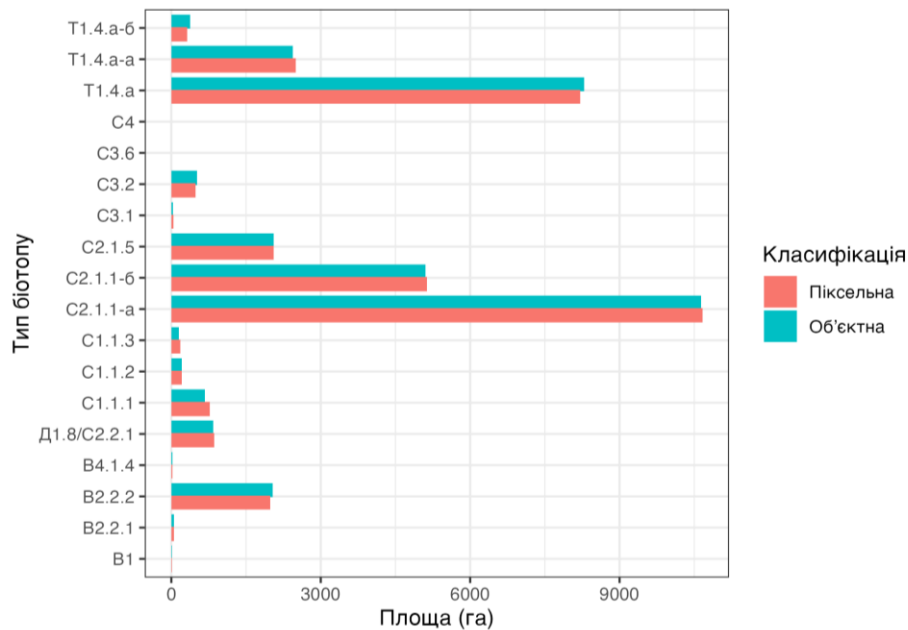


Рисунок 5. Площі типів біотопів БЗ, залежно від обраного методу класифікації.

Figure 5. Areas of habitat types of Falz-Fein Biosphere Reserve "Askania Nova", depending on the chosen classification method.

межами реальних біотопів. Позаяк для ефективної керованої класифікації потрібна велика кількість навчальних даних, в такий спосіб ми можемо ефективно масштабувати наявні наземні дані, а також доповнити навчальні дані типами біотопів, яких бракує в наземних інформаційних матеріалах. Так, в нашому дослідженні, початкові наземні дані – геоботанічні описи – не охоплювали штучні та синантропні біотопи. Навчальні дані для останніх було створено шляхом ручного присвоєння атрибута типу біотопу для сегментів, що за формою та розташуванням збігалися з характерними ділянками.

Основним недоліком об'єктного підходу, що проявився під час дослідження, була низька чутливість сегментації до об'єктів малої площі (будівлі тощо) та лінійної геометрії (дороги, канали). Використаний алгоритм сегментації розбиває зображення на сегменти, близькі за площею та формою, залежно від застосованих параметрів *size* та *compactness*. Втім, біотопи істотно різняться за цими ознаками: цілні масиви степу, перелоги або поля займають значні площі і тяжіють до компактної форми, тоді як згадані будівлі, узбіччя доріг, канали характеризуються малими площами та, як в останніх двох випадках, протяжною лінійною формою. Високі значення параметрів сегментації призводять до злиття дрібних та некомпактних об'єктів із більшими; низькі – до формування занадто дрібних сегментів, що зводить нанівець переваги об'єктного підходу над піксельним. Таким чином, кожна окрема територія вимагає ручного підбору параметрів сегментації. З означеної причини отримана карта біотопів репрезентує лише 18 типів біотопів із 29, виділених у класифікаційній схемі. У разі, коли ставиться завдання створити карту усіх типів біотопів території, ми рекомендуємо вручну наносити на карту позамасштабні типи (що мають мізерні розміри, вузько-лінійну форму, дискретний характер) або не можуть бути відображеними через сезонність, сівозміни (чергування сільськогосподарських культур) та ін.

Висновки

Вперше для території Біосферного заповідника "Асканія-Нова" імені Ф.Е. Фальц-Фейна укладено класифікаційну схему біотопів. У її основі лежить класифікація, що була запропонована у Національному каталозі біотопів України (2018), втім розширена та доповнена для специфічних типів біотопів, характерних для території БЗ. З використанням даних дистанційного зондування, методами сегментації зображень та машинного навчання було зроблено детальну карту біотопів БЗ станом на 2021 рік, що ми пропонуємо вважати фіксацією доокупаційного стану різноманіття природних комплексів території.

Для підвищення чутливості розпізнавання біотопів, ми використали комбінацію безпосередніх супутникових даних (оптичні канали Sentinel-2), узагальнених за п'ять років, та розрахованих на їх основі помісячних медіанних значень спектральних індексів NDVI та NDWI. Таким чином, ми доповнили безпосередні дані про відбиваність земної поверхні даними про фенологію, що є рекомендованою практикою для коректного розрізнення природних комплексів методами дистанційного зондування (Lucas et al., 2007; Yang et al., 2023).

Отримані результати свідчать про те, що одночасне використання медіанізованих спектральних даних та даних про сезонне варіювання спектральних індексів, у поєднанні з сегментацією зображень та керованою класифікацією, можна вважати надійним інструментом дистанційного картування більшості типів біотопів. Можливості масштабування підходу на більші території, переносність моделей на інші території та часові проміжки, підбір оптимальних параметрів моделей є предметом подальших досліджень. Водночас, не викликають сумнівів перспективи застосування підходу для дистанційної інвентаризації та моніторингу біотопічного різноманіття, особливо у регіонах, доступ до яких обмежений.

Проведений аналіз показав, що результати наземної ідентифікації біотопів із використанням експертних знань та архівних геоботанічних даних, у поєднанні з методами дистанційного зондування Землі й машинного навчання, дозволяють отримати доволі надійні дані щодо біотопічного різноманіття та площинного розподілу біотопів, що особливо цінно в умовах недоступності території для безпосереднього вивчення і верифікації. Отримані дані цілком можуть бути використані для подальшого моніторингу стану екосистем та їх змін внаслідок тимчасової окупації та воєнних дій.

Відкриті дані

Усі дані, що використані в дослідженні, та код для відтворення його результатів, розміщено у публічному репозиторії GitHub (https://github.com/olehprylutskiy/askania-nova_habitat_map) під відкритою ліцензією GPL-3.0. Використання коду або інших даних у похідних розробках зобов'язує до цитування репозиторію та цієї статті як першоджерел.

Подяки

Автори висловлюють вдячність PhD Дарії Боровик (Інститут ботаніки ім. М.Г. Холдного НАН України) за допомогу у класифікації геоботанічних описів та визначенні типів біотопів за експертною системою EUNIS-ESy, а також PhD Катерині Лавріненко (Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького), чия палітра кольорів для біотопів EUNIS лягла в основу використаної для ілюстрування карт у даній роботі.

Біотопи степової зони України / Ред. академік НАН України Я.П. Дідух. Київ–Чернівці : Друк Арт, 2020. 392 с.

Веденьков Е.П., Веденькова А.Г. Современное состояние и динамика растительности старейшего заповедного участка асканийской степи. *Актуальні питання збереження і відновлення степових екосистем : матер. міжнар. наук. конф., присв. 100-річчю заповідання асканійського степу (Асканія-Нова, 21–23 травня 1998 р.)*. Асканія-Нова : 1998. С. 20–25.

Веденьков Е.П., Водопьянова В.Г. Результаты изучения растительности заповедной степи Аскании-Нова. *Труды Украинского научно-исследовательского института животноводства степных районов им. М.Ф. Иванова "Аскания-Нова"*. 1969. Т. XIV. С. 75–100.

Веденьков Е.П., Ющенко А.К. Заповедник Аскания-Нова. *Заповедники СССР. Заповедники Украины и Молдавии*. Москва : Мысль, 1987. С. 114–138.

Десятова-Шостенко Н. Ботанічне обслідування степів Держзаповідника "Чаплі" (кол. Асканія-Нова) на весні 1927 р. *Вісті Державного Степового Заповідника "Чаплі"*. 1928. Т. VII. С. 153–163.

Дмитриев А.М. Луговодство с основами луговедения. Москва : Сельхозгиз, 1941. 351 с.

Дубина Д.В., Устименко П.М. Карта рослинності заповідного масиву "Долина нарцисів" (Закарпатська обл.). *Український ботанічний журнал*. 2007. № 4. С. 553–565.

Короткова Е.И. Динамика растительного покрова южно-украинской степи по наблюдениям в Аскании-Нова: дис... канд. биол. наук : 03.00.05. 1964. 243 с.

Національний каталог біотопів України / За ред. А.А. Куземко та ін. Київ : ФОП Клименко Ю.Я., 2018. 442 с.

Спінова Ю. Картування біотопів в аспекті формування локальних екомереж на прикладі природного заповідника "Крейдова флора". *Наукові записки НаУКМА. Біологія та екологія*. 2021. Т. 4. С. 47–50.

- Тищенко О.В., Тищенко В.М., Ткаченко В.С. Зміни рослинного покриву лесового острова Степок (Запорізька область) за 92-річний відтинок часу (1927–1999–2019). *Вісті Біосферного заповідника "Асканія-Нова"*. 2020. Т. 22. С. 4–9.
- Ткаченко В.С., Шаповал В.В. Сукцесії фітосистем ділянки "Північна" новоасканійського заповідного степу у другій половині ХХ і на початку ХХІ ст. *Вісті Біосферного заповідника "Асканія-Нова"*. 2010. С. 21–32.
- Устименко П.М., Климук Ю.В. Карта рослинності природного заповідника "Горгани" як основа фітоценотичного моніторингу. *Український ботанічний журнал*. 2006. Т. 63. № 3. С. 470–479.
- Шалыт М.С. Растительность степей Аскании-Нова. *Известия Крымского Педагогического института имени М.В. Фрунзе*. 1938. Т. VII. С. 45–133.
- Шаповал В.В. Сучасний стан та структура рослинності найстарішої ділянки асканійського степу – "Старої" (охороняється з 1898 р.). *Вісті Біосферного заповідника "Асканія-Нова"*. 2013. Т. 15. С. 22–39.
- Шаповал В.В. Матеріали до картографічного моніторингу постпірогенних сукцесій рослинності асканійського степу. *Вісті Біосферного заповідника "Асканія-Нова"*. 2018. Т. 20. С. 15–21.
- Abdi A.M. Land cover and land use classification performance of machine learning algorithms in a boreal landscape using Sentinel-2 data. *GIScience & Remote Sensing*. 2020. Vol. 57, № 1. P. 1–20.
- Abdulloieva O. МР EmS "NNP Pyriatynskiy". 2017.
- Achanta R., Susstrunk S. Superpixels and polygons using simple non-iterative clustering. *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition (CVPR)*, 2017. P. 4651–4660.
- Alleaume S., Dusseux P., Thierion V., Commagnac L., Laventure S., Lang M., Féret J.-B., Hubert-Moy L., Luque S. A generic remote sensing approach to derive operational essential biodiversity variables (EBVs) for conservation planning. *Methods in Ecology and Evolution*. 2018. Vol. 9, № 8. P. 1822–1836.
- Boser B.E., Guyon I.M., Vapnik V.N. A training algorithm for optimal margin classifiers. *Proceedings of the fifth annual workshop on Computational learning theory*. Pittsburgh Pennsylvania USA : ACM, 1992. P. 144–152.
- Breiman L., Friedman J., Olshen R., Stone C. Classification and regression trees. New York : Wadsworth Publishing, 1984. 368 p.
- Chytrý M., Tichý L., Hennekens S.M., Knollová I., Janssen J.A.M., Schaminée J.H.J., et al. EUNIS Habitat Classification: Expert system, characteristic species combinations and distribution maps of European habitats. *Applied Vegetation Science*. 2020. Vol. 23, N 4. P. 648–675.
- Davydova A. Vegetation mapping of the Dzharylhach Island (Ukraine). *Hacquetia*. 2022. Vol. 21, № 1. P. 163–172.
- Dronova I. Object-Based Image Analysis in Wetland Research: A Review. *Remote Sensing*. 2015. Vol. 7, № 5. P. 6380–6413.
- Esri. World Imagery basemap [Data provided by Esri, Maxar, Earthstar Geographics, and the GIS User Community]. 2024.
- EUNIS habitat classification 2012 – updated 2019 as regards two habitats. European Environment Agency 2019. <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/eunis-habitat-classification-1/habitats>
- Gislason P.O., Benediktsson J.A., Sveinsson J.R. Random Forests for land cover classification. *Pattern Recognition Letters*. 2006. Vol. 27, № 4. P. 294–300.
- Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*. 2017. Vol. 202. P. 18–27.
- Guth J., Kučera T. Natura 2000 habitat mapping in the Czech Republic: methods and general results. *Ekológia (Bratislava)*. 2005. Vol. 24, № 1. P. 39–51.
- Hengl T., Walsh M.G., Sanderman J., Wheeler I., Harrison S.P., Prentice I.C. Global mapping of potential natural vegetation: an assessment of machine learning algorithms for estimating land potential. *PeerJ*. 2018. Vol. 6. P. e5457.
- Hermosilla T., Wulder M.A., White J.C., Coops N.C. Land cover classification in an era of big and open data: Optimizing localized implementation and training data selection to improve mapping outcomes. *Remote Sensing of Environment*. 2022. Vol. 268. P. 112780.
- Hijmans R.J. terra: Spatial Data Analysis. 2024.
- Ho T.K. Random decision forests. *Proceedings of 3rd international conference on document analysis and recognition: IEEE*, 1995. P. 278–282.
- Kuzemko A. Ukrainian Grasslands Database. *Biodiversity & Ecology*. 2012. Vol. 4. P. 430–430.
- Kuzemko A., Prylutskyi O., Kolomytsev G., Didukh Y., Moysiienko I., Borsukevych L., Chusova O., Splodytel A., Khodosovtsev O. Reach the bottom: plant cover of the former Kakhovka Reservoir, Ukraine. *Research Square*. 2024.

- Lucas R., Rowlands A., Brown A., Keyworth S., Bunting P. Rule-based classification of multi-temporal satellite imagery for habitat and agricultural land cover mapping. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*. 2007. Vol. 62, № 3. P. 165–185.
- Matsala M., Odruzenko A., Hinchuk T., Myroniuk V., Drobyshch I., Sydorenko S., Zibtsev S., Milakovsky B., Schepaschenko D., Kraxner F., Bilous A. War drives forest fire risks and highlights the need for more ecologically-sound forest management in post-war Ukraine. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14, № 1. P. 4131.
- McFeeters S.K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International journal of remote sensing*. 1996. Vol. 17, № 7. P. 1425–1432.
- Myroniuk V., Weinreich A., Dosky V. von, Melnychenko V., Shamrai A., Matsala M., Gregory M.J., Bell D.M., Davis R. Nationwide remote sensing framework for forest resource assessment in war-affected Ukraine. *Forest Ecology and Management*. 2024. Vol. 569. P. 122156.
- Pebesma E. Simple features for R: standardized support for spatial vector data. *The R Journal*. 2018. Vol. 10, № 1. P. 439–446.
- Python Software Foundation. Python Language Reference. 2024.
- QGIS Development Team. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>. 2024.
- R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. 2024.
- Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Third earth resource technology satellite-1 symposium*. Washington, D.C. : NASA, 1974. P. 309–318.
- Ruiz L.F.C., Guasselli L.A., Simioni J.P.D., Belloli T.F., Barros Fernandes P.C. Object-based classification of vegetation species in a subtropical wetland using Sentinel-1 and Sentinel-2A images. *Science of Remote Sensing*. 2021. Vol. 3. P. 100017.
- Shapoval V., Skobel N., Vasyliuk O. Records of vascular plants, bryophytes and lichens in the core of the Askania-Nova Biosphere Reserve F.E. Falz-Fein and depressions lands based on relevés in 1967–2019. Version 1.1. 2024. Ukrainian Nature Conservation Group (NGO). Sampling event dataset <https://doi.org/10.15468/m4u6mx> 2024.
- Shevchuk S., Vyshnevskiy V.I., Bilous O. The Use of Remote Sensing Data for Investigation of Environmental Consequences of Russia-Ukraine War. *Journal of Landscape Ecology*. 2022. Vol. 15, № 3. P. 36–53.
- Tassi A., Vizzari M. Object-Oriented LULC Classification in Google Earth Engine Combining SNIC, GLCM, and Machine Learning Algorithms. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, № 22. P. 3776.
- Yang X., Qiu S., Zhu Z., Rittenhouse C., Riordan D., Cullerton M. Mapping understory plant communities in deciduous forests from Sentinel-2 time series. *Remote Sensing of Environment*. 2023. Vol. 293. P. 113601.

Received: 14 November 2024 / Revised: 8 December 2024 / Accepted: 30 December 2024