

УДК 551.03(477.72)"1965/2024"

DOI <https://doi.org/10.32999/ksu2413-7391/2025-22-10>

Шевчук Ю.С.,
аспірантка лабораторії геоекологічних досліджень
Центр досліджень природи, Вільнюс, Литва
julija.shevchuk@gamtc.lt
ORCID: 0009-0004-8034-8046

Давидов О.В.,
кандидат географічних наук,
доцент кафедри географії та екології
Херсонський державний університет,
провідний науковий співробітник,
Національний природний парк «Білобережжя Святослава»,
науковий співробітник,
Центр дослідження природи, Вільнюс, Литва
odavydov@ksu.ks.ua
ORCID: 0000-0003-2144-9627

Онойко Ю.Ю.,
кандидат географічних наук,
доцент кафедри природничих наук і методик їхнього навчання
Центральноукраїнський державний університет імені Володимира Винниченка,
geograf.cuspu@gmail.com
ORCID: 0000-0002-3311-7200

СУПУТНИКОВИЙ МОНІТОРИНГ ДИНАМІКИ ПЛОЩІ ВОДНОЇ ПОВЕРХНІ ОЗЕРА СОЛОНЕЦЬ-ТУЗЛИ, ПРИЧОРНОМОРСЬКА НИЗОВИНА, УКРАЇНА (ЗА 2024 РІК)

У статті представлено результати супутникового моніторингу сезонної динаміки площі водної поверхні озера Солонець-Тузли, розташованого в межах Причорноморської низовини, в районі Березанського лиману, протягом 2024 року. Для аналізу використано супутникові знімки Sentinel-2, за якими було розраховано індекс NDWI та сформовано композитні зображення у SWIR-діапазоні. Обробку отриманих даних здійснено в середовищах ArcGIS Pro, Google Earth Pro та RStudio. За матеріалами аналізу супутникових знімків, були проведені розрахунки площі водної поверхні досліджуваного озера, за кожен місяць 2024 року. Отримані результати, вказують на істотні сезонні коливання площі озера, від максимальної 5,53 км² (січень), до повного висихання та формування солончаку (серпень). Максимальна площа озера проявлялась в зимові місці, на весні площа озера суттєво зменшувалась до початку літа. На початку літа площа озера зазнала тимчасового підвищення, але потім стрімко зменшувалась до повного висихання у серпні. Восени площа озера повільно але перманентно збільшувалась до грудня місяця. Пересічне значення площі водної поверхні озера за 2024 рік, складало 2,98 км², при амплітуді в 5,53 км². Просторовий аналіз виявив неоднорідність висихання улоговини озера: північна частина втрачала воду швидше, а тому у липні вже була повністю пересохла, південна, особливо в центральній часті, залишалася зволоженою більш тривалий період часу, а повністю пересохла лише у серпні. Представлена неоднорідність висихання улоговини озера, зумовлена її морфологічними умовами.

Індекс NDWI виявив високу кореляцію з площею водойми, що підтверджує його ефективність для моніторингу невеликих нестабільних водойм (пересихаючих). SWIR-композити, своєю чергою, виявилися корисними для візуальної оцінки рівня зволоження, однак недостатньо точними для кількісного аналізу. Дослідження демонструє ефективність використання супутникових індексів для моніторингу водної динаміки малих солоних озер, в умовах кліматичних змін та антропогенного впливу.

Ключові слова: Солонець-Тузли, озеро, площа водної поверхні, супутниковий моніторинг, NDWI, SWIR, сезонна динаміка.



Shevchuk Y.S., Davydov O.V., Onoyko Yu.Yu. Satellite Monitoring Of The Dynamics Of The Water Surface Area Of Lake Solonets-Tuzly, Black Sea Lowland, Ukraine (for the Year 2024)

The article presents the results of satellite monitoring of seasonal dynamics of the water surface area of Lake Solonets-Tuzly, located within the Black Sea Lowland, near the mouth of the Berezan River, during 2024.

Sentinel-2 satellite images were used for the analysis, based on which the NDWI index was calculated and composite images in the SWIR range were formed. The obtained data were processed in ArcGIS Pro, Google Earth Pro, and RStudio environments. Based on the analysis of satellite images, calculations of the water surface area of the studied lake were made for each month of 2024. The results obtained indicate significant seasonal fluctuations in the lake's area, from a maximum area of 5.53 km² (January) to complete drying up and the formation of a salt marsh (August). The maximum area of the lake was observed in winter, while in spring, the area of the lake decreased significantly by the beginning of summer. At the beginning of summer, the lake area temporarily increased, but then rapidly decreased until it completely dried up in August. In autumn, the lake area slowly but steadily increased until December. The average water surface area of the lake in 2024 was 2.98 km², with an amplitude of 5.53 km². Spatial analysis revealed heterogeneity in the drying of the lake basin: the northern part lost water faster and therefore dried up completely by July, while the southern part, especially in the center, remained wet for a longer period and dried up completely only in August. The presented heterogeneity of the lake surface drying is due to its morphological conditions.

The NDWI index showed a high correlation with the area of the reservoir, confirming its effectiveness for monitoring small, unstable reservoirs. SWIR composites, in turn, proved useful for visual assessment of moisture levels but were not accurate enough for quantitative analysis. The study demonstrates the effectiveness of using satellite indices to monitor water dynamics in small salt lakes under conditions of climate change and anthropogenic impact.

Key words: Solonets-Tuzly, lake, water surface area, satellite monitoring, NDWI, SWIR, seasonal dynamics.

Вступ. В умовах кліматичних змін та посилення антропогенного впливу, незначні за розміром водойми, з обмеженим та неперіодичним поверхневим живленням, є найбільш вразливими гідрологічними об'єктами, які можуть зникнути з поверхні нашої планети. Зникнення або деградація відповідних об'єктів буде мати критичні наслідки для збереження біорізноманіття, особливо якщо представлені водойми входять до Смарагдової мережі або до регіонів важливих для підтримки птахів та біорізноманіття (Important Bird and Biodiversity Areas або IBAs) (Bird Life International, 2022).

Озеро Солонець-Тузли, що розташовано на березі Чорного моря в межах України, представляє собою специфічний водний об'єкт, який має важливе природоохоронне значення. Відповідне озеро належить до водно-болотних угідь міжнародного рівня, входить до складу Смарагдової мережі (код UA0000206), а також є частиною національного-природного парку «Білобережжя Святослава». Глобальні кліматичні зміни та антропогенна трансформація прилеглих до озера територій, істотно впливають на живлення водойми, що призводить до поступового але перманентного скорочення його площі, на багатолітньому етапі. За описаних тенденцій, відповідний природоохоронний

об'єкт, може втратити свою специфіку або навіть зникнути зовсім.

Враховуючи, що традиційні методи моніторингу водної поверхні мають обмежену оперативність і просторове охоплення, а в умовах проведення бойових дій не можуть мати систематичності, у 2024 році, на прохання керівництва національного природного парку «Білобережжя Святослава», був започаткований дистанційний моніторинг стану водної поверхні озера Солонець-Тузли. Деякі результати першого року моніторингу, представлені у відповідній публікації.

Мета роботи полягає в оприлюдненні матеріалів, щодо дистанційного дослідження динаміки водної поверхні озера Солонець-Тузли, у 2024 році, за даними аналізу супутникових знімків Sentinel-2.

Для досягнення поставленої мети, необхідно було вирішити наступні завдання:

- За результатами аналізу літературних джерел та регіонального картографічного матеріалу описати природні особливості озера Солонець-Тузли.

- Використовуючи EO-Browser, зібрати та обробити супутникові знімки Sentinel-2, за кожний місяць 2024 року.

- За результатами обробки супутникових знімків розробити SWIR-композиції та

провести первинне дешифрування даних, для аналізу сезонної динаміки водної поверхні досліджуваного озера.

– Використати нормалізований водний індекс (NDWI) для аналізу супутникових знімків Sentinel-2 та визначити його порогові значення для маскування водної поверхні з подальшим розрахунком площі водойми у різні місяці року та порівняння з матеріалами аналізу SWIR-композитів.

– За результатами аналізу супутникових знімків, із використанням SWIR-композитів та застосуванням NDWI та розробки масок водної поверхні, визначити кількісні показники динаміки площі водної поверхні озера Солонець-Тузли у 2024 році та виділити сезонні закономірності.

Район дослідження. Озеро Солонець-Тузли представляє собою незначну за розміром водойму, площею до 8 км², яка розташована на південному-сході Дністровсько-Бузької частини Причорноморської низовини (Рельєф України, 2010) (рис. 1 А), в районі гирлової області річки Березанка, напроти острова Березань (рис. 1 Б). Досліджуване озеро має прибережне місцезонашування та відділене від акваторії Чорного моря береговою акумулятивною формою «коса Тузла» (генетично не є косою, Зенкович, 1958; 1960).

Етимологія назви озера має географічну прив'язку та зумовлена її розташуванням біля селища Тузли, а також особливостями гідрологічного режиму водойми та періодичним пересиханням, з перетворенням на солончак, у теплий період року.

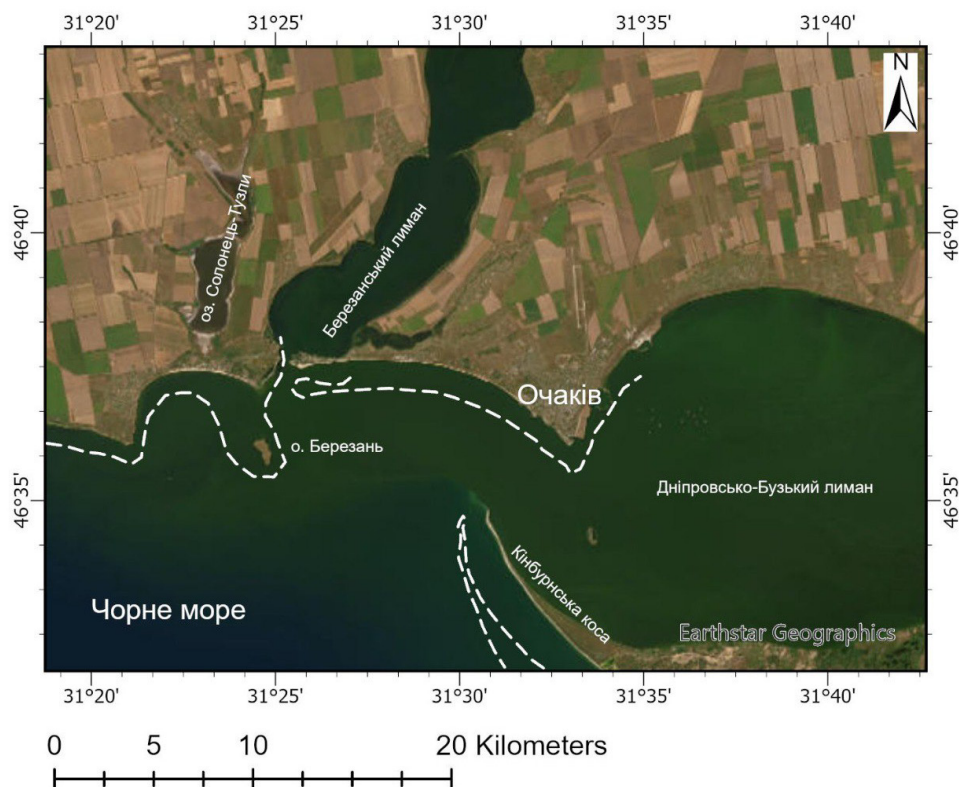
Ретроспективний аналіз регіональних карт за період з 1790 по 1986 роки, вказує, що перше зображення озера з назвою «Тузли», має місце на карті 1800 року (Подробная..., 1800). На картах першої половини XIX століття досліджуване озеро позначається як «Солоне» (Атлас Чорного моря, 1841). Назва озера Солонець Тузли, з'являється на картах другої половини XIX століття (Военно-топографическая карта, 1868). У Державному реєстрі географічних назв України (№ Ф-2635), зазначений об'єкт визначається як ставок Солонець-Тузли.

Досліджувана нами водойма в більшості випадків визначається як озеро, але за генетичними особливостями його слід відносити до лиманів (Геология шельфа УССР. Лиманы,

1984). Улоговина озера Солонець-Тузли представляє собою затоплене русло давнього водотоку, який раніше впадав до акваторії Чорного моря (або гирлової області Дніпра - Південного Бугу) та мав вигляд невеличкої мілководної затоки. Коливання рівня моря, у середньому та пізньому голоцені, а також значна кількість алювіальних та морських наносів, спричинили активну акумуляцію у гирловій частині даного водотоку. В результаті була сформована берегова форма, що відокремила від моря гирло водотоку та своїм тілом перетворила острів Березань на півострів. Відповідно, зазначена берегова форма, генетично представляє собою перейму (Зенкович, 1962) (рис. 2).



Рис. 1. Географічне розташування озера Солонець-Тузли: А – в межах України; Б – в межах Дністровсько-Бузької частини Причорноморської низовини; В – зовнішній вигляд озера та басейну стоку



**Рис. 2. Палеогеографічна схема району озера Солончесь-Тузли та Кінбурнської протоки, у середньому голоцені. Пунктиром позначено положення берегової смуги.
Розроблено за матеріалами В.П. Зенковича (Зенкович, 1958)**

Здіймання рівня моря, протягом пізнього голоцену та активізація хвильового розмиву, спричинили руйнування надводного тіла перейми та формування підводної мілководної перемички. Саме за таких умов, сучасна акумулятивна форма, що відокремлює улоговину озера Солончесь-Тузли, була перетворена на пересип (Зенкович, 1958).

Місцерозташування басейну озера Солончесь-Тузли, зумовлене геологічними умовами. Насамперед, район дослідження знаходиться в межах зони диз'юнктивних порушень, де виділяється два регіональних глибинних розломи, з якими пов'язано декілька поверхневих (Геологія шельфа УССР. Тектоника, 1987). Прилеглі до озера вододільні поверхні складені верхньо-четвертинними еолово-делювіальними та делювіальними відкладами (лесовидні суглинки з похованими ґрунтами). Схили балок представлені верхньо-четвертинними та сучасними делювіальними відкладами (суглинки та супесі), а дніща сучасними алювіально-делювіальними відкладами (піски та супесі). В межах озерної улоговини

виділяється сучасні та давньочорноморські лиманні та лиманно-морські відклади (піски, супіски та мули) (Геологія шельфа УССР. Литологія, 1985).

В межах басейну стоку озера Солончесь-Тузли, поширена яружно-балкова система, що врізана у середньо-пліоценову (Парутинську) терасу (Рельєф України, 2010). В морфологічній структурі представленого басейну стоку, виділяються шість складових (рис. 3):

- балка-яр Тузла: довжина $\approx 7,5$ км, глибина до 20-25 м, ширина до 190 м;
- балка Глибокий Яр: довжина 12,5 км, глибина до 20-25 м, ширина до 140;
- Василева балка: довжина 10 км, глибина до 25-30 м, ширина до 190 м;
- Безіменна балка: довжина 7 км, глибина до 20 м, ширина до 290 м;
- Мала балка: довжина ≈ 2 км, глибина до 3 м, ширина до 90 м;
- улоговина озера Солончесь-Тузли: довжина $\approx 7,2$ км, ширина до 1,7 км, площа ≈ 8 км², глибина до 0,3 – 0,7 м.



Рис. 3. Морфологічні складові басейну стоку озера Солонець-Тузли

Улоговина озера на заході, півночі та сході (окрім місць впадіння ярів балок) характеризуються чітко вираженими обривами, з висотою від 3 до 15 метрів. У верхній третині, улоговина озера розділена штучною земляною дамбою на дві частини (рис. 3).

Район розташування озера характеризується недостатньою зволоженістю, при загальній кількості опадів - в 400-450 мм/рік, максимально можливе випаровування складає 975-1000 мм/рік. Представлені кліматичні умови впливають на гідрологічний режим озера та сприяють його періодичному пересиханню (Звіт про науково-дослідну роботу, 2023).

Основним джерелом живлення озера є атмосферні опади та тимчасовий поверхневий стік, який здійснюється за яружно-балковою системою. Вважається, що часткове живлення може відбуватися за рахунок розвантаження локальних підземних вод та інфільтрації через тіло пересипі (Геологія шельфу УССР. Лиманы, 1984). В межах гирла балки Тузли, побудована дамба, а тому поверхневий стік в цьому напрямку до озера відсутній.

Басейн досліджуваного озера належить локальних басейнів стоку, з інфільтраційним типом водообміну із акваторією Чорного моря. За таких умов, площа водного дзеркала та глибина озера, насамперед залежить від кількості

атмосферних опадів. За наведених умов, озеро періодично пересихає у теплий період року, а у обводненому стані представляє собою гіпергалінну (солоність $>45\text{‰}$) водойму (Звіт з науково-дослідної роботи, 2023).

Матеріали і методи. Для визначення динаміки площі водного дзеркала озера Солонець-Тузли, був застосований інтегрований підхід, який передбачає використання супутникових знімків Sentinel-2, геоінформаційної обробки в середовищі ArcGIS Pro, попередньої візуальної оцінки в Google Earth Pro та статистичного аналізу в RStudio. Зазначена методика реалізована у вигляді шести етапів, що відображені у блок-схемі (рис. 4).



Рис. 4. Блок-схема методики дослідження динаміки водної поверхні озера Солонець-Тузли, за супутниковими даними Sentinel-2

Етап 1. Завантаження супутникових знімків Sentinel-2.

Дані було отримано з відкритої платформи EO-Browser Hub. Використовувалися знімки Sentinel-2 (рівень обробки Level-2A), які містять показники поверхневого відбиття (surface reflectance) з атмосферою корекцією (ESA Standard Document, 2015). Для забезпечення репрезентативності аналізу відбиралися знімки з мінімальною хмарністю (не більше 10%) та повним покриттям озерної котловини. Знімки підбиралися із щомісячною періодичністю, протягом обраного року.

Етап 2. Формування композитів у SWIR-діапазоні.

Для первинної візуальної оцінки стану озера та прилеглих територій сформовано композитні зображення в короткохвильовому інфрачервоному діапазоні (SWIR). Застосовано канали Sentinel-2: B12, B11, B8A. Композити створювалися у середовищі ArcGIS Pro, з використанням інструменту *Composite Bands*, що дозволило візуально розмежувати зволожені



та сухі ділянки, особливо у фазі літнього висихання (Ji, et al., 2009; Lichen Lu, 2023).

Етап 3. Розрахунок водного індексу NDWI.

Для кількісного аналізу водної поверхні було використано NDWI (Avezov S., 2024), який ефективно виділяє воду завдяки її високій рефлексивності у зеленому діапазоні та поглинанню у ближньому ІЧ-діапазоні. Формула складається з Green — канал зеленої частини спектру (~560 нм) та NIR — ближній інфрачервоний (~842 нм) і має вигляд (McFeeters, S. K. 1996):

$$NDWI = \frac{(Green - NIR)}{(Green + NIR)} \quad (1)$$

Розрахунок індексу та попередня класифікація NDWI були виконані в ArcGIS Pro за допомогою Raster Calculator. Отримані растри зберігалися у форматі GeoTIFF для подальшого аналізу.

Етап 4. Оптимізація порогу NDWI та маскування водної поверхні

Для точного виділення водної поверхні здійснено підбір оптимального порогового значення NDWI, що відрізняє воду від інших типів покриття (вологий ґрунт, рослинність, тінь). Порогове значення в більшості випадків становило $NDWI > 0.1-0.3$.

Маскування проводилось у два етапи:

1. Google Earth Pro — верифікація кордонів озера в різні сезони.

2. RStudio — автоматичне застосування порогу NDWI до всіх знімків за допомогою пакетів raster, terra, sf.

Результатом етапу були бінарні маски водної поверхні (1 – вода, 0 – суша) (Hijmans, et al., 2021).

Етап 5. Розрахунок площі водної поверхні

Маски, отримані на попередньому етапі, були перетворені на векторні полігони у ArcGIS Pro (інструмент Raster to Polygon). Площа кожного полігону розраховувалась автоматично (Calculate Geometry Attributes) та експортувалась у формат CSV для аналізу в RStudio (Hijmans, et al., 2021).

Етап 6. Візуалізація результатів

Результати обробки були подані у вигляді: а) графіків динаміки зміни площі водної поверхні протягом року (з використанням ggplot2); б) таблиць статистичних показників (середні, дисперсія, амплітуда); в) картографічних матеріалів із NDWI-індексами та

SWIR-композицями (Wickham, 2016, Ji, et al., 2009). Це дозволило візуалізувати сезонні темпи заповнення / висихання озера та виявити періоди найбільшої гідрологічної активності.

Результати дослідження. Озеро Солонець-Тузли - це незначна за параметрами водойма, площа водної поверхні якої складає $\approx 8 \text{ км}^2$ (Ільїн, Мартинюк, 1998; Богданова, 2015; Вичаловська, 2018).

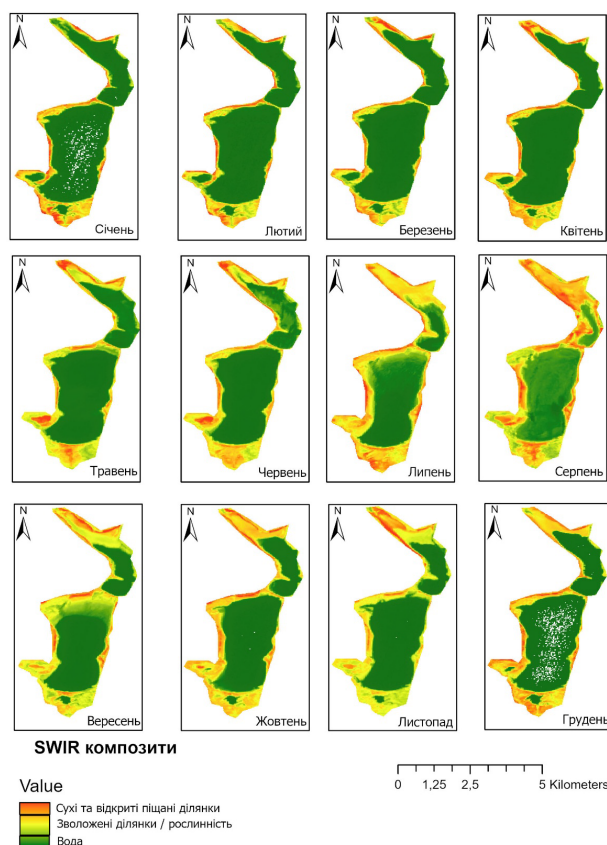


Рис. 5. Композитні зображення улоговини озера Солонець-Тузли, в короткохвильовому інфрачервоному діапазоні (SWIR)

Представлений у зазначених джерелах параметр площі, не підтверджений даними інструментальних вимірювань. Відповідно, для визначення реальних параметрів озерної улоговини, було здійснено вимірювання її площі, за контуром берегових обривів (у онлайн-ресурсі Google Earth, за супутниковим знімком 2022 року). Отриманий результат також біля 8 км^2 , а це дозволяє використовувати відповідний показник, як точку відліку, для порівняння із параметрами площі водної поверхні у 2024 році.

Не систематичні польові спостереження співробітників національного природного

парку «Білобережжя Святослава» (Звіт з науково-дослідної роботи, 2015; 2018; 2022), вказують на істотну динаміку водної поверхні озера Солонець-Тузли, як протягом року, так і на багатолітньому етапі. Найбільша площа водної поверхні озера, проявляється у зимо-во-весняний період, а найменша у літньо-осінній. Періодично озеро, не на тривалий період повністю пересихає.

Представлені еволюційні тенденції озера, зумовлюють накопичення на його поверхні мулистих та галоїдних відкладів. Наявність галоїдних відкладів, впливає на процес дистанційного дослідження, який базується на аналізі супутникових знімків із використанням спектральних індексів.

На першому етапі дослідження, за результатами аналізу супутникових знімків, були отримані SWIR-композиції (рис. 5), які використовуються для визначення змін меж водної поверхні озера (Ji, et al., 2009). Наявність на поверхні улоговини озера шару солі, не дозволило нам отримати достовірні та коректні матеріали.

За відповідних умов, для аналізу супутникових знімків, ми використали NDWI (водний) індекс. У процесі аналізу NDWI-індексу, було встановлено оптимальне порогове значення $NDWI > 0,15$, що забезпечує більш точне виділення меж водної поверхні. За результатами аналізу відповідного індексу, були побудовані маски водної поверхні, що демонструють реальну картину динаміки площі водного дзеркала досліджуваного озера у 2024 році (рис. 6).

За результатами кількісного аналізу показників площі озера, визначеної за допомогою індексу NDWI, була розроблена графічна візуалізація динаміки площі водної поверхні озера Солонець-Тузли, за 2024 рік (рис. 7).

Кількісний аналіз показників динаміки площі водної поверхні озера Солонець-Тузли, за 2024 рік, вказує, що за відповідний період, середня площа водної поверхні становила $2,98 \text{ км}^2$. При цьому максимальний показник площі озера складав $5,53 \text{ км}^2$, а мінімальний 0 км^2 , що вказує на повне пересихання водойми. Відповідно коефіцієнт варіації площі озера, за 2024 рік, складає 100%, що свідчить про нестабільний режим живлення.

Аналіз показників індексу NDWI, дозволив виявити просторову неоднорідність

пересихання водойми: найраніше пересихали північна частина озера, в той час як південна демонструвала більш тривалий час існування водної поверхні.

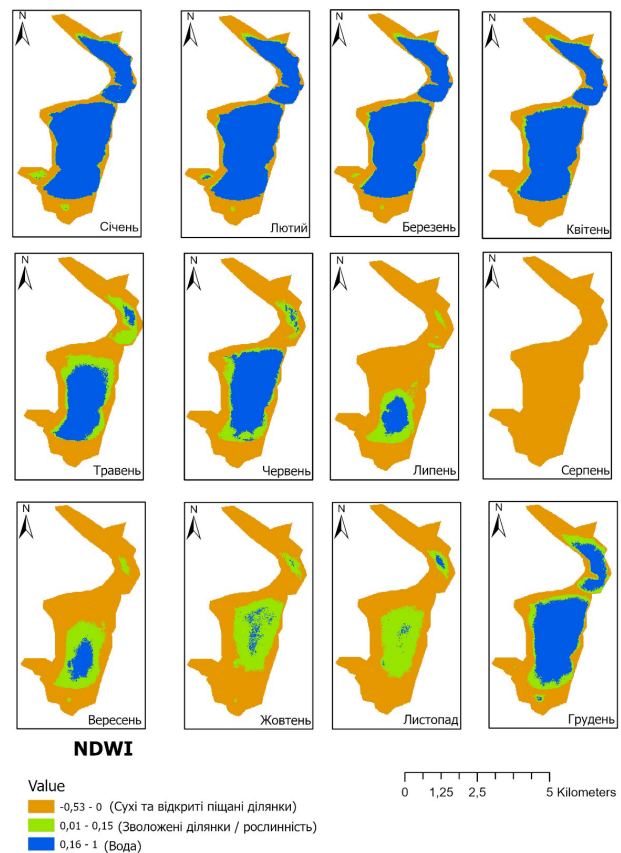


Рис. 6. Динаміка площі водної поверхні озера Солонець-Тузли у 2024 році, за показниками NDWI

Представлена ситуація пов'язана із більш значною глибиною улоговини озера в його південній частині. Аналіз індексу показав високий рівень кореляції із площею водної поверхні озера (коефіцієнт кореляції $R \approx 0,98$), що свідчить про надійність цього індексу для моніторингу невеликих водойм (табл. 1).

Для візуалізації та кореляції показників індексу NDWI із площею озера Солонець Тузли, був побудований графік, який вказує на високий рівень кореляції та надійність запропонованого методу дослідження площі водної поверхні у незначних за площею водоймах (рис. 8).

Представлені результати відображають ключові зміни площі водної поверхні озера упродовж 2024 року. Підтверджені сезонні тенденції динаміки водної поверхні озера, в умовах кліматичних змін та антропогенного впливу на режим живлення.

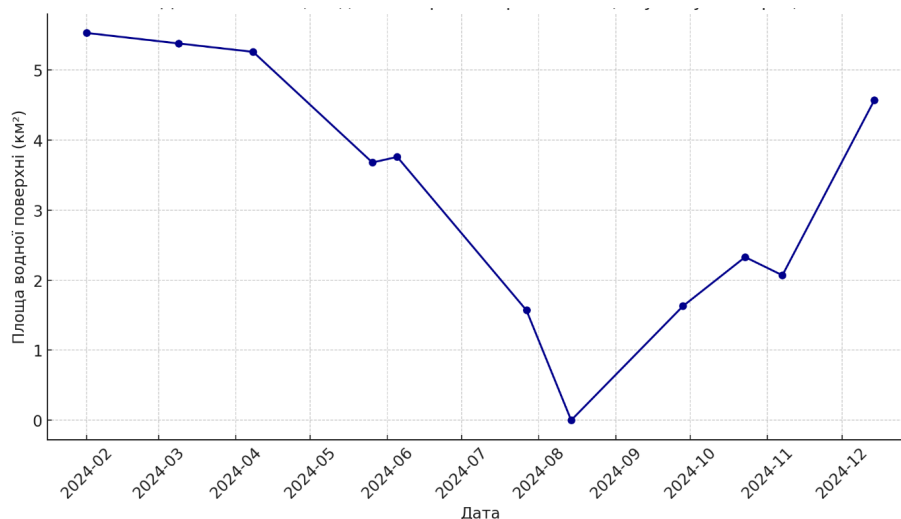


Рис. 7. Динаміка площі водної поверхні озера Солонець-Тузли у 2024 році

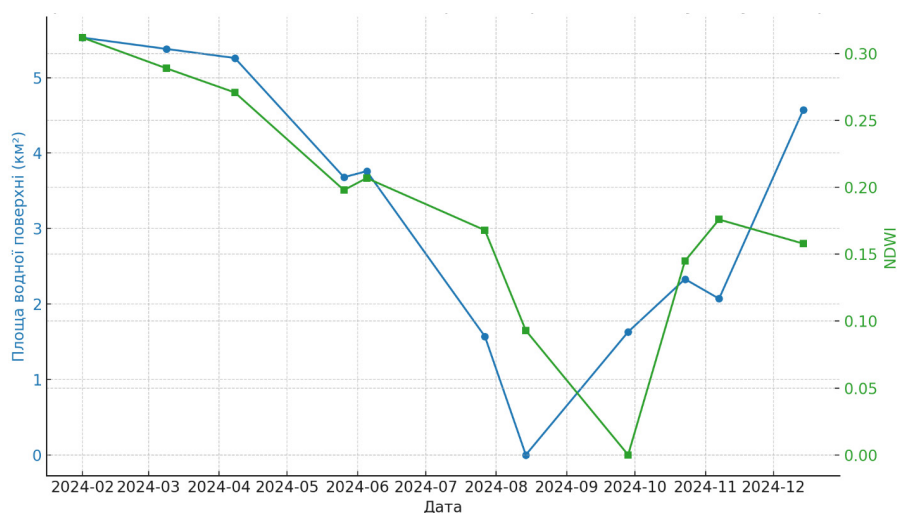


Рис. 8. Графік порівняння показників індексу NDWI та площі водної поверхні озера Солонець-Тузли, у 2024 році

Таблиця 1
Динаміка показників індексу NDWI та площі водної поверхні озера Солонець-Тузли у 2024 році

Дата	Середній NDWI	Площа, км²
2024-02-01	0.312	5.53
2024-03-09	0.289	5.38
2024-04-08	0.271	5.26
2024-05-26	0.198	3.68
2024-06-05	0.207	3.76
2024-07-27	0.168	1.57
2024-08-14	0.093	0.00
2024-09-28	0.000	1.63
2024-10-23	0.145	2.33
2024-11-07	0.176	2.07
2024-12-14	0.158	4.57

Дискусія. Озеро Солонець-Тузли представляє собою специфічний водний об'єкт, з нестійким та неперіодичним живленням, розташований в межах степової зони, в умовах з високими показниками випаровування. За таких умов, вода в озері характеризується високим вмістом солей, а озеро в теплий період року повністю або частково пересихає, а на поверхні улоговини утворюється шар солі.

Зазначені природні особливості озера, зумовлюють специфіку його дослідження дистанційними методами. Для визначення динаміки водної поверхні досліджуваного озера, було використано два підходи: побудова короткохвильових інфрачервоних композитів та обчислення водного індексу. Паралельне застосування

представлених підходів дозволило достовірно оцінити параметри динаміки площі водної поверхні, при візуальній та кількісній оцінці.

Використання SWIR-композитів, сформованих на основі каналів Sentinel-2 (B11, B12 і B8A), забезпечили візуальний аналіз ступеня зволоження території та загального заповнення озерної улоговини водою. Під час проведення дослідження, було визначено, що SWIR не забезпечує точного розмежування між ділянками з солоною водою та зволоженою поверхнею, вкритою шаром солі. Відповідно, зазначений підхід не може використовуватись як інструмент для кількісної оцінки динаміки площі поверхні гіпергалінної водойми.

NDWI (водний індекс), розрахований за каналами Green і NIR, забезпечив кількісну ідентифікацію меж водної та зволоженої поверхонь. Застосування порогового значення $> 0,15$ дозволило чітко маскувати відкриту воду та визначити площу озера на кожен дату супутникового зображення. Висока кореляція між NDWI та фактичною площею води ($R \approx 0,98$) підтверджує ефективність цього індексу для моніторингу гіпергалінних водойм.

Отримані параметри динаміки площі водної поверхні озера, вказують на чітко виражені сезонні тенденції заповнення та осушення озерної улоговини. Відносно сталий рівень водойми проявлявся з грудня по лютий, що пояснюється режимом випадіння опадів та низьким рівнем випаровування.

У першій половині весни проявилось швидке падіння рівня та зменшення площі водної поверхні озера. Це зумовлено сучасними кліматичними особливостями регіону, а саме ранньовесняною посухою. Наприкінці весни та на початку літа, рівень озера зазнавав коливань. Тенденція до зниження рівня та зменшення площі продовжувалась, але на початку червня, перервалася на нетривалий час, що пов'язано із проявленням зливових опадів над районом дослідження.

Із середини літа рівень та площа водної поверхні швидко зменшувалась, та у серпні озеро повністю висохло. Це пояснюється дуже високими температурами та інтенсифікацією випаровування об'єкту дослідження у другій половині літа 2024 року.

З початком осені, площа водної поверхні в озері збільшувалась, до середини жовтня,

після чого на нетривалий період зменшилась, а потім знову піднімалася до початку грудня. Представлена динаміка зумовлена режимом випадіння опадів на районом дослідження у 2024 році.

Описана динаміка площі водної поверхні, підтверджує результати попередніх не періодичних польових спостережень, які вказують на істотну та закономірну динаміку площі протягом року. В той же час, отримані параметри площі (табл. 1), вказують на зменшення загальної водності досліджуваної водойми. Максимальна площа водної поверхні у 2024 році складала $5,53 \text{ км}^2$, що менше ніж показники 2005 року ($7,35 \text{ км}^2$) та 2017 років ($6,18 \text{ км}^2$). Дана ситуація може бути пояснена як кліматичними змінами так і антропогенною трансформацією ярів, що впадають до озера.

Висновки. За результатами проведенного дослідження ми дійшли наступних висновків:

1. Озеро Солонець-Тузли є гіпергалінною водоймою, навколо якої сформований локальний басейн стоку, розташований у межах прибережної частини Причорноморської низовини, в районі західного берегу Березанського лиману. Морфологічні умови та місце розташування складових частин басейну, зумовлені проявом системи диз'юнктивних порушень. Улоговина озера представляє собою незначну за розмірами депресію (площа до 8 км^2), до якої впадає п'ять ярів або балок. Улоговина озера та прилеглі яри характеризуються певним ступенем антропогенної трансформації, за рахунок будівництва дамб. Озеро ізольоване від акваторії Чорного моря та до нього не впадають постійні водотоки, що зумовлює істотне коливання площі озера та його періодичне пересихання.

2. Для проведення дистанційного дослідження, було використано платформу EO-Browser та супутникові знімки Sentinel-2. Загалом було опрацьовано 39 знімків, по два або три за кожен місяць 2024 року.

3. На основі опрацьованих зображень, було створено 12 SWIR-композитів, за якими проведено первинне дешифрування даних, спрямованих на визначення параметрів сезонної динаміки водної поверхні досліджуваного озера. За результатами аналізу SWIR-композитів було визначено, що зазначений інструмент первинного дешифрування, не придатний для



точного картографування меж водної поверхні пересихаючого гіпергалінного озера.

4. Визначення порогових значень NDWI дозволяє розробити достовірні маски водної поверхні з подальшим розрахунком площі водойми за кожен місяць 2024 року. Відповідно, NDWI можна вважати ключовим інструментом отримання достовірної інформації при супутниковому аналізі мілководних солоних водойм із динамічним водним режимом.

5. За результатами аналізу супутникових знімків було визначено, що в динаміці площі водної поверхні досліджуваного озера проявляються чітко виражені сезонні тенденції. Найбільша площа та відносно сталий рівень водойми проявлявся в зимовий період, на весні площа водойми стрімко зменшувалась. На початку літа відбулась стабілізація площі та незначне збільшення, а у другій половині літа відбулося різке скорочення рівня води та повне пересихання. Восени, площа повільно збільшувалась до середини жовтня, потім відбулась стабілізація на нетривалий період часу, а потім нове здійснення. Представлені кількісні параметри динаміка площі водної поверхні, є першими інструментально визначеними показники, які підтверджує результати попередніх спостережень та вказує на істотну та закономірну динаміку площі озера протягом року.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Avezov S., Yunusova D., Yusupjonov O., Kazakbaeva M., Gulmurzaeva R., Saksonov U., Ruzikulova O., Djumabaeva S. 2024. Quantifying Water Bodies with Sentinel-2 Imagery and NDWI: A Remote Sensing Approach. *E3S Web of Conferences*, 590(6). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202459002007>
2. *Bird Life International*. 2022. Important Bird and Biodiversity Areas (IBAs) factsheet: Tuzly Lagoons. Retrieved from <https://datazone.birdlife.org/about-our-science/ibas>
3. European Space Agency. 2015. *Sentinel-2 User Handbook*. ESA Standard Document. Retrieved from <https://sentinels.copernicus.eu>
4. Hijmans, R. J., van Etten, J., Sumner, M., Cheng, J., Bevan, A., Bivand, R., Busetto, L., Canty, M., Forrest, D., Ghosh, A., Golicher, D., Gray, J., Greenberg, J. A., Hengl, T., Hijmans, E., Lovelace, R., Lu, J., Mosher, S., Pebesma, E., ... & Shortridge, A. 2021. *Spatial Data Analysis*. Retrieved from <https://cran.r-project.org/web/packages/terra/index.html>
5. Ji, L., Zhang, L., & Wylie, B. 2009. Analysis of dynamic thresholds for the normalized difference water

index. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 75(11), 1307–1317. <https://doi.org/10.14358/PERS.75.11.1307>

6. Lichen Lu, Huiling Sun. 2023. Dynamic monitoring of surface water areas of nine plateau lakes in Yunnan Province using long time-series Landsat imagery based on the Google Earth Engine platform. *Geocarto International* 38(1):1-18. <https://doi.org/10.1080/10106049.2023.2253196>

7. McFeeters, S. K. 1996. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425–1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>

8. Wickham, H. Navarro, D., Pedersen, T. 2016. *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York. Retrieved from <https://ggplot2-book.org/>

9. *Атлас Чорного моря*. 1841. Е. Манганари. Гидрографическое Черноморское депо. Николаев. 33 с. [*Atlas of the Black Sea*. 1841. E. Manganari. Hydrographic Black Sea Depot. Nikolaev. 33 p.] (in Russian).

10. Богданова, Т. В. 2015. Видовий склад ряду Coleoptera на прилеглий території озера Солонець-Тузли. *Регіональна науково-практична конференція*, 23–28 листопада 2015 р.: матеріали. Миколаїв, МНУ ім. В. О. Сухомлинського. с. 21. [Bogdanova, T. V. 2015. Species composition of the Coleoptera order in the area surrounding Lake Solonets-Tuzly. *Regional scientific and practical conference*, November 23–28, 2015: materials. Mykolaiv, V. O. Sukhomlynsky Mykolaiv National University. p. 21]. (in Ukrainian).

11. Вичалковська, Н. В. 2018. Дослідження фауни акваторії та прилеглої території озера Солонець-Тузли. *Всеукраїнська науково-практична конференція: Комплексне збереження історико-культурної спадщини у заповідних об'єктах*, 10–11 травня 2018 р., м. Очаків, матеріали. Миколаїв: ЧНУ ім. Петра Могили. С. 10–12. [Vychalkovska, N. V. 2018. Research on the fauna of the water area and surrounding territory of Lake Solonets-Tuzly. *All-Ukrainian Scientific and Practical Conference: Comprehensive preservation of historical and cultural heritage in protected areas*, May 10–11, 2018, Ochakiv, materials. Mykolaiv: Petro Mohyla Black Sea National University. Pp. 10–12.] (in Ukrainian).

12. *Военно-топографическая карта Российской империи. Херсонская губерния*. 1869. Ф.Ф.Шуберт. Санкт-Петербург. Военно-топографического депо [*Military topographic map of the Russian Empire. Kherson Province*. 1869. F.F. Schubert. Saint Petersburg. Military Topographic Depot] (in Russian).

13. *Геология шельфа УССР. Лиманы*. 1984. Киев: Наукова думка. 176 с. [*Geology of the Ukrainian SSR Shelf. Limans*. 1984. Kyiv: Naukova Dumka. 176 p.]. (in Russian).

14. *Геология шельфа УССР. Литология*. 1985. Киев: Наукова думка. 192 с. [*Geology of the Ukrainian SSR Shelf. Lithology*. 1985. Kyiv: Naukova Dumka. 192 p.]. (in Russian).

15. *Геология шельфа УССР. Тектоника*. 1987. Киев: Наукова думка. 152 с. [*Geology of the Ukrainian*

SSR Shelf. Tectonics. 1987. Kyiv: Naukova Dumka. 152 p.]. (in Russian).

16. *Звіт про науково-дослідну роботу Літопис природи НПП «Білобережжя Святослава» (заключний)*. 2015. Том IV. Чаус, В., Марчинська, О., Козловський, Ю., Редінов, К., Непейн, А. Очаків: НПП «Білобережжя Святослава», 213 с. [Report on scientific research work Chronicle of Nature of the Biloberezhzhya Svyatoslav National Nature Park (final). 2015. Volume IV. Chaus, V., Marchynska, O., Kozlovsky, Yu., Redinov, K., Nepein, A.; scientific editor Marchynska, O. Ochakiv: Biloberezhzhya Svyatoslava National Nature Park, 213 p.] (in Ukrainian).

17. *Звіт про науково-дослідну роботу Літопис природи НПП «Білобережжя Святослава» (заключний)*. 2018. Том VII. Козловський, Ю., Чаус, В., Марчинська, О., Редінов, К., Маркауцан, О., Касьянов, Є.; наук.ред. Касьянов Є. Очаків: НПП «Білобережжя Святослава», 251 с. [Report on scientific research work Chronicle of Nature of the Biloberezhzhya Svyatoslav National Nature Park (final). 2018. Volume VII. Kozlovsky, Yu., Chaus, V., Marchynska, O., Redinov, K., Markautsan, O., Kasyanov, Ye.; scientific editor Kasyanov E. Ochakiv: Biloberezhzhya Svyatoslava National Nature Park, 251 p.] (in Ukrainian).

18. *Звіт про науково-дослідну роботу Літопис природи НПП «Білобережжя Святослава» (заключний)*. Том X. 2022. Коваль В., Чаус В., Редінов К., Маркауцан О., Касьянов Є. та ін.; наук.ред. Касьянов Є. Очаків: НПП «Білобережжя Святослава», 309 с. [Report on scientific research work Chronicle of Nature of the Biloberezhzhya Svyatoslav National Nature Park (final). Volume X. 2022. Koval V., Chaus V., Redinov K., Markautsan O., Kasyanov E., et al.; scientific editor Kasyanov E. Ochakiv: Biloberezhzhya Svyatoslava National Nature Park, 309 p.] (in Ukrainian).

19. *Звіт про науково-дослідну роботу Літопис природи НПП «Білобережжя Святослава» (заключний)*. 2023. Том XII. У 2-х частинах. Коваль В., Чаус В., Редінов К., Маркауцан О., Давидов О., Касьянов Є. та ін.; наук.ред. Касьянов Є. Очаків: НПП «Білобережжя Святослава», 506 с. [Report on scientific research work Chronicle of Nature of the Biloberezhzhya Svyatoslav National Nature Park (final). 2023. Volume XII. In 2 parts. Koval V., Chaus V.,

Redinov K., Markautsan O., Davydov O., Kasyanov E., et al.; scientific editor Kasyanov E. Ochakiv: Biloberezhzhya Svyatoslava National Nature Park, 506 p.] (in Ukrainian).

20. Зенкович, В.П. 1958. *Берега Черного и Азовского морей*. Москва. Государственное издательство географической литературы. 374 с. [Zenkovich, V.P. 1958. *Shores of the Black and Azov Seas*. Moscow. State Publishing House of Geographical Literature. 374 p.] (in Russian).

21. Зенкович, В.П. 1960. *Морфология и динамика советских берегов Черного моря. Т. II (Северо-западная часть)*. Москва: АН СССР. 216 с. [Zenkovich V.P. 1960. *Morphology and dynamics of the Soviet coast of the Black Sea. T. II (North-Western part)*. Moscow: USSR Academy of Sciences. 216 p.] (in Russian).

22. Зенкович, В.П. 1962. *Основы учения о развитии морских берегов*. Москва: АН СССР, 710 с. [Zenkovich, V.P. 1962. *Fundamentals of the doctrine of the development of sea shores*. Moscow: AS USSR, 710 p.] (in Russian).

23. Ільїн Л.В., Мартинюк В.О. 1998. *Озера України: Довідник*. Львів: Львівський державний університет ім. І. Франка, 52 с. [Ilyin L.V., Martynyuk V.O. 1998. *Lakes of Ukraine: Reference Book*. Lviv: Ivan Franko State University of Lviv, 52 p.] (in Ukrainian).

24. Подробная милитерная карта по границе России с Турциею. 1800. Е. И. В. Депо. Санкт-Петербург. [Detailed military map of the border between Russia and Turkey. 1800. E. I. V. Depo. Saint Petersburg.] (in Russian).

25. *Рельєф України. Навчальний посібник*. 2010. Вахрушев, Б.О., Ковальчук, І.П., Комлев, О.О., Кравчук, Я.С., Палієнко, Е.Т., Рудько, Г.І., Стецюк, В.В.; [За загальною редакцією В.В. Стецюка]. Київ: Слово, 688 с. [The Relief of Ukraine. Textbook. 2010. Vakhrushev, B.O., Kovalchuk, I.P., Komlev, O.O., Kravchuk, Ya.S., Palienko, E.T., Rudko, G.I., Stetsyuk, V.V.; [Edited by V.V. Stetsyuk]. Kyiv: Slovo, 688 p.] (in Ukrainian).

Стаття надійшла до редакції 29.05.2025.

The article was received 29 May 2025.